

**T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**WEDM YÖNTEMİNDE İŞLEM PARAMETRELERİNİN
MİKRO YAPI ve YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNE ETKİSİ**

Ulaş ÇAYDAŞ

**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE EĞİTİMİ ANABİLİM DALI**

ELAZIĞ, 2002

116625



T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**WEDM YÖNTEMİNDE İŞLEM PARAMETRELERİNİN
MİKROYAPI ve YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNE ETKİSİ**

Ulaş ÇAYDAŞ

17662

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

Bu tez, 08.04.2003 tarihinde aşağıda belirtilen jüri tarafından oybirliği / ~~oyçokluğu~~ ile başarılı / ~~başarısız~~ olarak değerlendirilmiştir.

Danışman : Yrd. Doç. Dr. Ahmet HASÇALIK

Üye

Üye : Yrd. Doç. Dr. Mustafa AKSOY

Üye

Üye : Prof. Dr. ALİ İNAN

Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 15.../ 04.../ 2003 tarih ve

3/2 sayılı kararıyla onaylanmıştır.

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanması esnasında, yardım ve desteklerini esirgemeyen başta danışman hocam Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümü öğretim üyesi sayın Yrd. Doç. Dr. Ahmet HAŞÇALIK' a, Metal Eğitimi araştırma görevlilerinden Bülent KURT ve Soner BUYTOZ' a, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği araştırma görevlilerinden M.Yavuz SOLMAZ' a ve Şükrü YILDIRIM' a teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Ayrıca, Makine Eğitimi yüksek lisans öğrencilerinden Faruk KARACA'ya teşekkürlerimi sunarım.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
TEŞEKKÜR.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	VII
TABLolar LİSTESİ.....	VIII
KISALTMALAR.....	IX
ÖZET.....	X
ABSTRACT.....	XI
1. GİRİŞ.....	1
2. ELEKRO EROZYON YÖNTEMİ.....	3
2.1. Talaş Kaldırma Mekanizması.....	3
2.2. Başlıca Elektroerozyon Çeşitleri.....	8
2.2.1. Elektro Erozyon (Electrical Discharge Machining) EDM.....	8
2.2.2. Tel Erozyon (Wire Electrical Discharge Machining) WEDM.....	8
2.2.3. Freze Erozyon (Electrical Discharge Milling).....	8
2.2.4. Taşlama Erozyon (Electrical Discharge Grinding) EDC.....	8
2.2.5. Ultrasonik Destekli Erozyon (Ultrasonic Aided EDM)UEDM.....	9
2.2.6. Micro Elektro Erozyon (Micro Electro Discharge Machining)MEDM.....	9
2.2.7. Miro Tel Erozyonu.....	9
2.2.8. Oyma erozyon(Mole EDM).....	9
3. TELEROZYON YÖNTEMLERİ.....	10
3.1. WEDM'nin Tarihçesi.....	14
3.2. Tel Erozyon Tezgahının İşleme Parametreleri.....	16
3.2.1. Puls Süresi (ON Time)	16
3.2.2. Puls Ara Süresi (OFF time)	16
3.2.3. Puls Ara Süresi Ayarı (MA=Puls OFF duration adjustment).....	16
3.2.4. Yardımcı Güç Kaynağı Devresi (HP).....	17
3.2.5. Ana Güç Kaynağı Maksimum Akımı (IP).....	17
3.2.6. Ana Güç Kaynağı Voltajı (V)	17
3.2.7. Aralık Voltajı (SV)	18
3.2.8. Tabla İlerleme Hızı (SF)	18
3.2.9. C (Kapasite)	18
3.2.10. Tel Gerilmesi (WT)	18
3.2.11. Tel İlerleme Hızı (VW)	18
3.2.12. Dielektrik Sıvısı.....	18
3.2.13. Sirkülasyon Basıncı.....	20
3.3. Tel Erozyon Uygulamalarında Kesme Performansını Etkileyen Faktörler... ..	20
3.3.1. Kesme Doğruluğu.....	20
3.3.2. Tel Eğilmeleri.....	21
3.3.3. Tel Kırılmaları.....	22
3.3.4. Kesme Hızı.....	22
3.4. Yüzey Pürüzlülüğü.....	22
3.5. Tel Erozyon Yönteminin Uygulama Alanları.....	23
3.5.1. Kalıp ve Kalıp Parçaları.....	23
3.5.2. Prototip İşlemi.....	24
3.5.3. Torna Takımları.....	24
3.5.4. Özel Şekil Malzemeleri.....	24
3.5.5. Broşlar.....	24
3.5.6. Şablonlar.....	25
3.6. WEDM'nin Avantaj ve Dezavantajlar.....	25
4. KONUN LİTERATÜRDEKİ YERİ.....	26
5. DENEY ÇALIŞMALARI.....	31
5.1. Çalışmanın Amacı.....	31

5.2. Deneylerde Kullanılan Tel Erozyon Tezgahının Özellikleri.....	32
5.3. Deneylerde Kullanılan Malzemeler.....	33
5.4. Deney Yöntemi.....	34
5.5. Metalografik İncelemeler.....	37
5.6. Mikrosertlik Ölçümleri.....	37
5.7. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri.....	38
6. DENEY SONUÇLARI ve İRDELENMESİ.....	39
6.1. Metalografik İnceleme Sonuçları.....	39
6.2. Mikrosertlik Ölçüm Sonuçları.....	51
6.2.1. Puls Süresinin Etkisi.....	51
6.2.2. Dielektrik Sıvı Sirkülasyon Basıncının Etkisi.....	54
6.2.3. Tel İlerleme Hızının	56
6.2.4. Ana Güç Voltajının Etkisi.....	59
6.2.5. Kesme Alanının Etkisi.....	61
6.3. Yüzey Pürüzlülük Ölçüm Sonuçları.....	65
6.3.1. Puls Süresinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi.....	65
6.3.2. Sıvı Sirkülasyon Basıncının Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi.....	69
6.3.3. Tel İlerleme Hızının Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi	71
6.3.4. Ana Güç Voltajının Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi.....	73
6.3.5. Kesme Alanının Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi.....	76
6.4. Kesme Hızı Deney Sonuçları	86
7. GENEL SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	91
KAYNAKLAR.....	94

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa No
Şekil 2.1 Talaş Kaldırma Sürecinde 1. Aşama.....	2
Şekil 2.2 Talaş Kaldırma Sürecinde 2. Aşama.....	3
Şekil 2.3 Talaş Kaldırma Sürecinde 3. Aşama.....	3
Şekil 2.4 Talaş Kaldırma Sürecinde 4. Aşama.....	4
Şekil 2.5 Talaş Kaldırma Sürecinde 5. Aşama.....	5
Şekil 2.6 Talaş Kaldırma Sürecinde 6. Aşama.....	5
Şekil 2.7 Talaş Kaldırma Sürecinde 7. Aşama.....	6
Şekil 2.8 Talaş Kaldırma Sürecinde 8. Aşama.....	6
Şekil 2.9 Talaş Kaldırma Sürecinde 9. Aşama.....	7
Şekil 3.1 Tel Erozyon ile Kesme İşlemi	11
Şekil 3.2 Başlangıç Deliğinin Pozisyonu	12
Şekil 3.3 WEDM' nin Şematik Görünüşü	13
Şekil 3.4 WEDM' de İşlem Mekanığı	14
Şekil 3.5 Telin İzlemesi Gereken Yoldan Sapmalar	20
Şekil 5.1 Tezgahın Hareket Eksenleri ve Kılavuz Açılı Durumu	31
Şekil 5.2 Tel Erozyon Tezgahının Şematik Görünüşü	31
Şekil 5.3 Deneylerde Kesilen İş Parçalarının Ölçüleri	32
Şekil 5.4 Kesme Yüzeyine Göre Mikroyapı İnceleme Bölgesi	36
Şekil 5.5 Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Yönleri	37
Şekil 6.1 D5 Takım Çeliğinin Sem Mikroyapı Fotoğrafı	38
Şekil 6.2 Kesme Sonrasında Oluşan Tabakaların Şematik Görünüşü	38
Şekil 6.3 D5 Takım Çeliğinin Frezede Elde Edilen Yüzey Geometrisi	39
Şekil 6.4 D5 Takım Çeliğinin Tel Erozyonda Elde Edilen Yüzey Geometrisi	39
Şekil 6.5 Düşük On ve V Parametrelerinde Kesilen Isıl İşlemsiz D5' in Mikroyapı Fotoğrafı (On= 3 ns ve V= 100 volt)	41
Şekil 6.6 Isıl İşlemsiz D5 Takım Çeliğine Ait Mikroyapı Fotoğrafı (On= 5 ns ve V= 100 volt)	41
Şekil 6.7 Isıl İşlemsiz D5 Takım Çeliğine Ait Mikroyapı Fotoğrafı (On= 7 ns ve V= 270 volt)	41
Şekil 6.8 D5 Takım Çeliğinin Optik Mikroskop Görüntüsü	42
Şekil 6.9 Takım Çeliğinin Optik Mikroskop Görüntüsü	42
Şekil 6.10 Takım Çeliğinin Optik Mikroskop Görüntüsü	43
Şekil 6.11 Yüzeyden Ana Matrise Doğru Mikro Çatlak Yapısı	44
Şekil 6.12 White Layer Tabakası Altında Mikro Çatlak Görüntüsü	44
Şekil 6.13 White Layer Tabakası Altında Mikro Çatlak Görüntüsü	45
Şekil 6.14 İşlem Parametrelerinin Artmasıyla Çatlak Yoğunluğu Dağılımı	46
Şekil 6.15 Alüminyum Numunelerin Kesme Yüzeylerinden Alınan Optik Mikroskop Fotoğrafı	46
Şekil 6.16 Alüminyum Numunelerin Kesme Yüzeylerinden Alınan Optik Mikroskop Fotoğrafı	47
Şekil 6.17 Alüminyumun optik fotoğrafı	47
Şekil 6.18 Alüminyumun SEM mikroyapı fotoğrafı	49
Şekil 6.19 Teldeki krater görüntüsü	50
Şekil 6.20 Teldeki krater görüntüsü	50
Şekil 6.21 Puls Süresinin Mikrosertliğe Etkisi	51
Şekil 6.22 Puls Süresinin Mikrosertliğe Etkisi	52
Şekil 6.23 Puls Süresinin Mikrosertliğe Etkisi	54
Şekil 6.24 Sıvı Sirkülasyon Basıncının Mikrosertliğe Etkisi	55
Şekil 6.25 Sıvı Sirkülasyon Basıncının Mikrosertliğe Etkisi	56
Şekil 6.26 Tel İlerleme Hızının Mikrosertliğe Etkisi	57

Şekil 6.27 Tel İlerleme Hızının Mikrosertliğe Etkisi	58
Şekil 6.28 Ana Güç Kaynağının Mikrosertliğe Etkisi	60
Şekil 6.29 Ana Güç Kaynağının Mikrosertliğe Etkisi	61
Şekil 6.30 Kesme Alanının Mikrosertliğe Etkisi	62
Şekil 6.31 Kesme Alanının Mikrosertliğe Etkisi	63
Şekil 6.32 Kesme Alanının Mikrosertliğe Etkisi	64
Şekil 6.33 Puls Süresinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi	65
Şekil 6.34 Puls Süresinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi	66
Şekil 6.35 Puls Süresinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi	67
Şekil 6.36 Puls Süresinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi	68
Şekil 6.37 Dielektrik Sıvı Sirkülasyon Basıncının Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi	70
Şekil 6.38 Dielektrik Sıvı Sirkülasyon Basıncının Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi	70
Şekil 6.39 Tel İlerleme Hızının Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi	71
Şekil 6.40 Tel İlerleme Hızının Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi	72
Şekil 6.41 Voltajın Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi	73
Şekil 6.42 Voltajın Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi	74
Şekil 6.43 Kesilen Yüzey Alanının Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi	75
Şekil 6.44 Kesilen Yüzey Alanının Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi	76
Şekil 6.45 Parametrelerin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi	77
Şekil 6.46 Parametrelerin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi	78
Şekil 6.47 Parametrelerin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi	79
Şekil 6.48 Parametrelerin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi	80
Şekil 6.49 Parametrelerin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi	81
Şekil 6.50 Parametrelerin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi	82
Şekil 6.51 Parametrelerin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi	83
Şekil 6.52 Parametrelerin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi	84
Şekil 6.53 Puls Süresinin Kesme Hızına Etkisi	85
Şekil 6.54 Gerilimin Kesme Hızına Etkisi	86
Şekil 6.55 Tel İlerleme Hızının Kesme Hızına Etkisi	87
Şekil 6.56 Sıvı Sirkülasyon Basıncının Kesme Hızına Etkisi	89

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa No
Tablo 5.1. Deneylerde Kullanılan D5 Takım Çeliğinin Kimyasal Analizi	31
Tablo 5.2. Deneylerde Kullanılan Alüminyum Alaşımının Kimyasal Analizi	32
Tablo 5.3. Deneylerde Kullanılan Parametreler	34
Tablo 6.1. Deney Parametrelerine Bağlı Olarak Mikrosertlik Değerleri	49
Tablo 6.2. Deney Parametrelerine Bağlı Olarak Mikrosertlik Değerleri	50
Tablo 6.3. Deney Parametrelerine Bağlı Olarak Mikrosertlik Değerleri	51
Tablo 6.4. Deney Parametrelerine Bağlı Olarak Mikrosertlik Değerleri	53
Tablo 6.5. Deney Parametrelerine Bağlı Olarak Mikrosertlik Değerleri	54
Tablo 6.6. Deney Parametrelerine Bağlı Olarak Mikrosertlik Değerleri	55
Tablo 6.7. Deney Parametrelerine Bağlı Olarak Mikrosertlik Değerleri	56
Tablo 6.8. Deney Parametrelerine Bağlı Olarak Mikrosertlik Değerleri	58
Tablo 6.9. Deney Parametrelerine Bağlı Olarak Mikrosertlik Değerleri	59
Tablo 6.10. Deney Parametrelerine Bağlı Olarak Mikrosertlik Değerleri	60
Tablo 6.11. Deney Parametrelerine Bağlı Olarak Mikrosertlik Değerleri	61
Tablo 6.12. Deney Parametrelerine Bağlı Olarak Mikrosertlik Değerleri	62
Tablo 6.13. Düşük Gerilim Girdilerinde Puls Süresi Değişimine Göre Yüzey Pürüzlülük Değerleri	64
Tablo 6.14. Düşük Gerilim Girdilerinde Puls Süresi Değişimine Göre Yüzey Pürüzlülük Değerleri	65
Tablo 6.15. Düşük Gerilim Girdilerinde Yüzey Pürüzlülük Değerleri	67
Tablo 6.16. Yüksek Gerilim Girdilerinde Yüzey Pürüzlülük Değerleri	67
Tablo 6.17. Düşük Gerilim Girdilerinde Sıvı Basınç Değişimine Göre Yüzey Pürüzlülük Değerleri	68
Tablo 6.18. Yüksek Gerilim Girdilerinde Sıvı Basınç Değişimine Göre Yüzey Pürüzlülük Değerleri	69

Tablo 6.19. Düşük Gerilim Girdilerinde Tel İlerleme Hızı Değişimine Göre Yüzey Pürüzlülük Değerleri	70
Tablo 6.20. Yüksek Gerilim Girdilerinde Puls Süresi Değişimine Göre Yüzey Pürüzlülük Değerleri	71
Tablo 6.21. Düşük Gerilim Girdilerinde Gerilim Değişimine Göre Yüzey Pürüzlülük Değerleri ...	72
Tablo 6.22. Yüksek Gerilim Girdilerinde Gerilim Değişimine Göre Yüzey Pürüzlülük Değerleri .	73
Tablo 6.23. Yüksek Gerilim Girdilerinde Kesilen Yüzey Alanı Değişimine Göre Yüzey Pürüzlülük Değerleri	74
Tablo 6.24. Yüksek Gerilim Girdilerinde Kesilen Yüzey Alanı Değişimine Göre Yüzey Pürüzlülük Değerleri	75
Tablo 6.25. Parametre İçeriklerine Göre Yüzey Pürüzlülük Değerleri	76
Tablo 6.26. Parametre İçeriklerine Göre Yüzey Pürüzlülük Değerleri	77
Tablo 6.27. Parametre İçeriklerine Göre Yüzey Pürüzlülük Değerleri	78
Tablo 6.28. Parametre İçeriklerine Göre Yüzey Pürüzlülük Değerleri	79
Tablo 6.29. Parametre İçeriklerine Göre Yüzey Pürüzlülük Değerleri	80
Tablo 6.30. Parametre İçeriklerine Göre Yüzey Pürüzlülük Değerleri	81
Tablo 6.31. Parametre İçeriklerine Göre Yüzey Pürüzlülük Değerleri	82
Tablo 6.32. Parametre İçeriklerine Göre Yüzey Pürüzlülük Değerleri	83
Tablo 6.33. Puls Süresi değişimine Göre Kesme Hızı Değerleri	84
Tablo 6.34. Gerilim değişimine Göre Kesme Hızı Değerleri	85
Tablo 6.35. Tel İlerleme hızının değişimine Göre Kesme Hızı Değerleri	86
Tablo 6.36. Sıvı Sirkülasyon Basınç değişimine Göre Kesme Hızı Değerleri	87

KISALTMALAR

C	:Kapasite (μf)
HP	:Yardımcı Güç Kaynağı Devresi
HV	:Mikrosertlik Değeri
IP	:Ana Güç Kaynağı Maksimum Akımı (Amper)
MA	:Puls Ara Süresi Ayarı
OFF	:Puls Ara Süresi (μs)
ON	:Puls Süresi (ns)
R_a	:Yüzey Pürüzlülük Değeri (μm)
SEM	:Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
SF	:Tabla İlerleme Hızı (mm/dak)
SSB	:Sıvı Sirkülasyon Basıncı (kg/cm^2)
SV	:Aralık Voltajı (Volt)
V	:Ana Güç Kaynağı Voltajı (Volt)
WS	:Tel İlerleme Hızı (m/dak)
WT	:Tel Gerilmesi (gr)

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

WEDM YÖNTEMİNDE İŞLEM PARAMETRELERİNİN MİKROYAPI ve YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNE ETKİSİ

Fırat Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Eğitimi Anabilim Dalı

2002, Sayfa : 92

Son yıllarda, bilim ve teknolojinin hızlı gelişimi, hem malzeme hem de bu malzemelerin ürün hale getirilmesinde kullanılan yöntemlerden beklentileri artırmaktadır. bu çalışmalar doğrultusunda geliştirilen imalat yöntemlerinden biri de (Wire Electro Discharge Machining) tel erozyonla imalat yöntemidir. Tel erozyon, üzerinden yüksek yoğunlukta akım geçirilen bir tel yardımıyla kesme işlemidir. Klasik olmayan imal usulleri arasında yer alan bu yöntemle sert, karmaşık profilili iletken parçaların mikron hassasiyetinde işlenebilmesi mümkündür.

Bu çalışmada, tel erozyon yönteminin kesme parametrelerine bağlı olarak malzeme yüzeyinde mikroyapı değişimi ve yüzey pürüzlülüğü incelenmiştir. Kesme işlemlerinde puls süresi, gerilim, sıvı sirkülasyon basıncı ve tel ilerleme hızı değişken olarak alınırken, tabla ilerleme hızı, tel gerginliği, puls ara süresi ve tel çapı sabit olarak alınmıştır. Deneylerde 0,25mm çapında pirinç tel kullanılmıştır. Kesme işlemi sonunda elde edilen numunelerin mikroyapıları optik ve SEM mikroskoplarında incelenmiş, mikrosertlik ve yüzey pürüzlülükleri ölçülmüştür. Ayrıca tel aşınması ve malzemelerdeki talaş kaldırma hızı tespit edilmiştir.

Çalışmanın sonunda, farklı özelliklere sahip malzemelerde kesme işlemi sonunda makine elemanlarının çalışma verimleriyle doğrudan ilgili olan yüzey pürüzlülük ve mikro yapı değişimleri, işlem parametrelerine bağlı olarak değiştiği tespit edilmiştir. Bu bakımdan, üretilecek makine elemanından beklenen özelliklere göre uygun parametrelerin seçilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

Çalışmanın birinci bölümünde konuya giriş yapılmış, ikinci bölümde elektro-erozyon yönteminin talaş kaldırma mekanizması verilmiş ve başlıca elektro-erozyon yöntemleri tanıtılmıştır. Üçüncü bölümde tel erozyon yöntemi ve işlem parametreleri kısaca verilmiş, tel erozyon yönteminin başlıca kullanım alanları tanıtılmıştır. Dördüncü bölümde yapılan çalışmanın literatürdeki yeri incelenmiştir ve konuyla ilgili çalışmalardan örnekler verilmiştir. Beşinci bölümde deneysel çalışmanın yöntemi ve deneylere hazırlık aşamaları verilmiştir. Çalışmanın altıncı bölümünde deney sonuçları tartışılarak yorumlanmış, yedinci ve son bölümde ise deneyler sonunda elde edilen sonuçlar verilmiştir.

Anahtar Kelimeler : Tel Erozyon, Mikro yapı, Yüzey Pürüzlülüğü.

ABSTRACT

Master Thesis

THE EFFECTS OF PROCESS PARAMETERS ON THE MICROSTRUCTURE AND SURFACE ROUGHNESS IN THE WEDM PROCESS

**Firat University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Education**

2002, Page : 92

Recently, with progress in science and technology, the expectations from the processes used in product manufacturing and properties of material have been increased. One of the manufacturing process is also wire electro- discharge machining developed in direction this researchs. The wire electro- discharge machining is a cutting process by a wire passed on electrical current with high intensity. It is possible machining in micron tolerances to hard and complex shape materials by this method that is a non-traditional machining process.

In this study, the microstructure variation and surface roughness according to cutting parameters were investigated. In cutting experiments, puls on time, voltage, dielectric fluid circulation pressure and wire feed rate were taken as alternative when table feed rate, wire tension, pulse off time and wire diameter were constant. In experiments brass wire of 0,25 mm diameter were used. In end of cutting operations, the microstructure of specimens were examined by optic and SEM microscopy. The microhardness and surface roughness were measured. In addition, the wear of wire and material removed rate determinated.

As a result of study, in end of cutting operations of the materials with different properties, the surface roughness and microstructure variations concerning working performance of machine elements were determinated to changed according to process parameters. From this view, it was attained to conclusion that suitable parameters must select according to expecting properties.

In the first chapter of study, the subject was introduced. In the second chapter, the material removal mechanism was given and several electro- discharge machining proceses introduced. In third chapter, wire electro- discharge machining and proceses parameters were given briefly, the area of use presented. In the fourth chapter, the place in literature of study was investigated and the some studies were given concerning this subject. In the fifth chapter, the method of experimental study and the preparation phases to experiments were presented. In the sixth chapter, the results were given and discussed. In the seventh and final chapter, general results and recommendations were given.

Keywords : Wire Erosion, Microstructure, Surface Roughness.

1. GİRİŞ

Son yıllarda, teknolojinin hızlı gelişmesi hem malzeme hem de bu malzemelerin kullanılabilir ürün haline getirilmesinde kullanılan yöntemlerden beklentileri arttırmaktadır. Bu çalışmalar doğrultusunda geliştirilen ve henüz gelişim süresi tamamlanmamış imalat yöntemlerinden biri de normal talaş kaldırma yöntemlerinden farklı olarak üzerinden akım geçen bir tel yardımı ile talaş kaldıran ve bilgisayar kontrollü olarak çalışan tel erozyon tezgahlarıdır.

Hızlı gelişmekte olan tel erozyon teknolojisi, üretim mühendisliği alanında oldukça önemli bir rol oynamaya başlamıştır. Tel erozyon ile işleme yöntemi, 1940'lardan itibaren geliştirilmiş ve günümüzde elektro-kimyasal, mekanik ve termal metal ergitme yöntemleri şeklinde birçok sınıflara ayrılarak çeşitli endüstriyel dallarda yeni bir işleme metodu olarak genişleyerek kullanılmaktadır.

Tel erozyon (WEDM); üzerinden yüksek yoğunlukta akım geçirilen bir tel yardımıyla kesme işlemidir. Bu yöntemde, dielektrik sıvı ortamında, elektriksel kutuplara bağlanan tel elektrot iş parçasına yaklaştırıldığında, elektriksel boşalmalarla yüksek bir sıcaklık meydana gelmekte ve yerel olarak metali ergiterek kesme işlemi yapılmaktadır. Talaş kaldırma hızı her bir kıvılcımdaki enerji miktarı ve her kıvılcımın zaman orallığına göre değişmektedir. Tel erozyon tezgahlarının programlama yöntemleri, genellikle geometrik çizim esasına dayanmakta ve grafik verileri hazırlama ortamı olarak, APT (Automatically Programmed Tools) dilinin çeşitli versiyonları kullanılmaktadır. WEDM (Wire Electro Discharge Machining) genellikle bilgisayar sayısal kontrol, daldırılmış (submerged) işleme, güvenilir otomatik tel sürme, programlanabilir çok eksenli hareket sistemi ve otomatik su/yağ dielektrik değiştirme gibi unsurlar ile malzemelerin işlenmesindeki kolaylığından dolayı çok sert ve karmaşık şekilli parçaların imalatı için en iyi alternatifi sağlar. Ayrıca yüksek sertlikteki elektrik iletkenlik özelliğine sahip yeni alaşımların işlenmesinde etkinliği ispatlanmıştır (Poyrazoğlu 1994). Özellikle kalıp imalatında, sadece telin yarıçapı kadar bir tolerans bırakarak kesme işlemi yaptığı için dişi ve erkek kalıp yapımında çok kolaylık sağlar. Ayrıca klasik imalat yöntemlerinde işlenebilmesi çok zor olan sert ve karmaşık geometrili iş parçalarının işlenmesi mümkün olmaktadır.

Tel kullanarak elektro boşalmalarla kesme işlemi (WEDM), esas itibarı ile elektro-termal bir yöntemdir. Genellikle makine edilen iş parçasının yüzeyi başka bir işleme tabi tutulmaz ve son yüzey olarak kabul edilir. WEDM, konfigürasyon olarak testere ile kesme işlemine benzerdir. Burada kullanılan testere küçük çapta bir tel elektrotudur. Diğer bütün geleneksel olmayan işleme yöntemlerinde olduğu gibi, WEDM'nin önemli avantajlarından

biride iş parçası ile tel elektrotu arasında hiçbir fiziksel ilişkinin (temasın) olmamasıdır. Bunun bir sonucu olarak kesme işlemi için hiçbir ilerleme gücüne gerek yoktur.



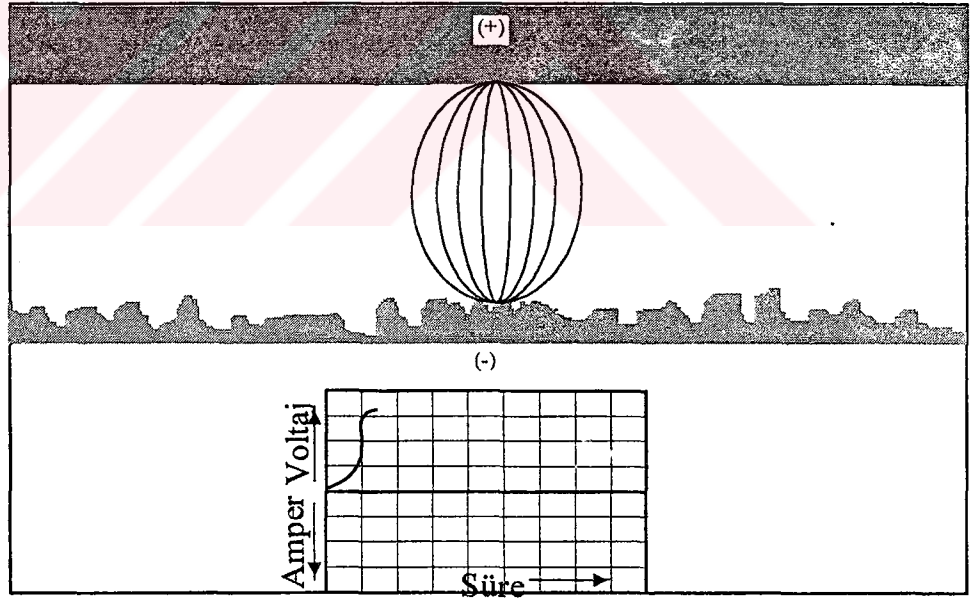
2. ELEKTRO EROZYON YÖNTEMİ

2.1. Talaş Kaldırma Mekanizması

Elektro Erozyon yönteminin talaş kaldırma sürecinde bir çevrimde meydana gelen olaylar aşağıda dokuz aşamada açıklanmıştır. Bu ardışık On – Off düzeni bir EDM çevrimini temsil etmekte ve saniyede 250 000 defa tekrarlanmak suretiyle malzemeden talaş kaldırmaktadır. Şekildeki grafikler tanımlanan noktalarda izafi olarak akım ve voltaj değerlerini göstermektedir.

1. Aşama

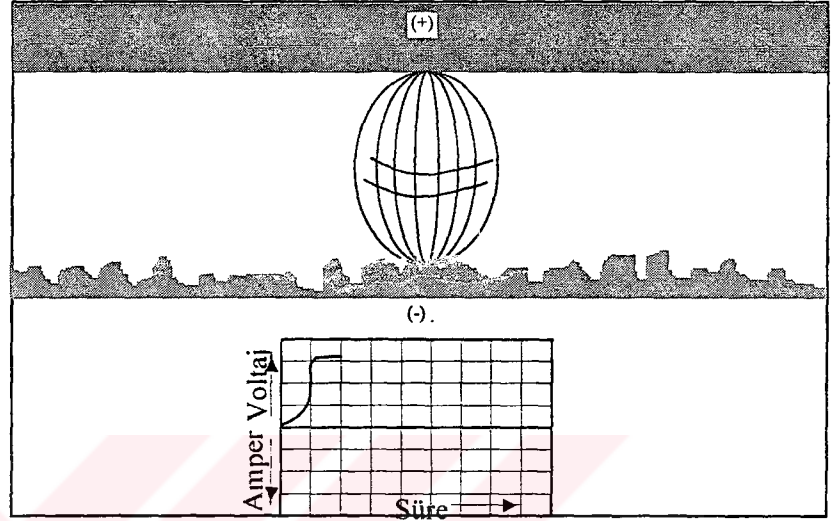
Elektrot ile iş parçası belirli bir mesafe ile birbirlerine yaklaştığında, dielektrik sıvı her ikisinin arasında yalıtkan görevi yaparak herhangi bir ark oluşumuna müsaade etmez. Ancak yeterli büyüklükte bir elektriksel potansiyel veya bir önceki çevrimden kalan metalik parçacıklar, sıvının yalıtkanlık özelliğini bozabilir. Şekilde görüldüğü gibi elektrot ve iş parçası arasındaki en yakın noktada elektriksel alan maksimum düzeydedir. Voltaj artmakta ancak akımın sıfır olduğu görülmektedir.



Şekil 2.1 Talaş Kaldırma Sürecinde 1. Aşama.

2. Aşama

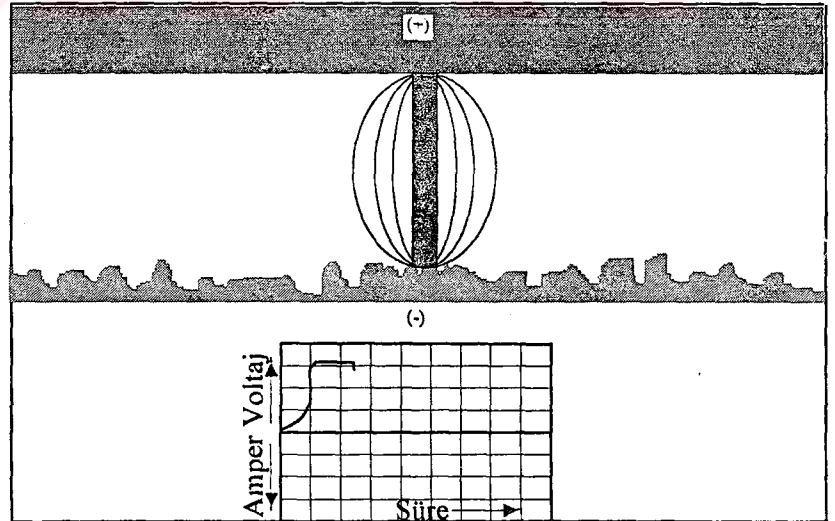
Şarj edilen atomların sayısı artarken, dielektrik sıvının izolasyon özelliği elektrik alanının en güçlü olduğu yerde dar bir kanal boyunca azalmaya başlar. Voltaj en yüksek düzeye ulaşır fakat akım hala sıfırdır.



Şekil 2. 2 Talaş Kaldırma Sürecinde 2. Aşama.

3. Aşama

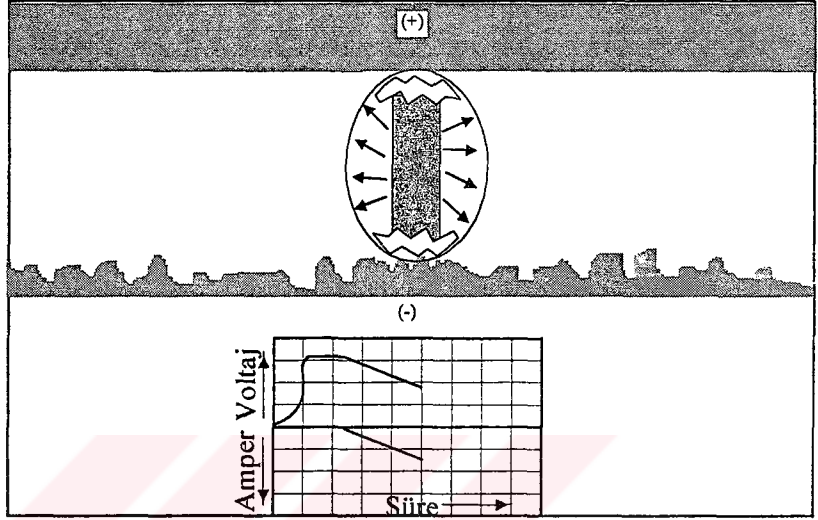
Akım sıvının yalıtkanlık özelliğini yok eder, kıvılcım çakar ve voltaj azalmaya başlar.



Şekil 2. 3 Talaş Kaldırma Sürecinde 3. Aşama.

4. Aşama

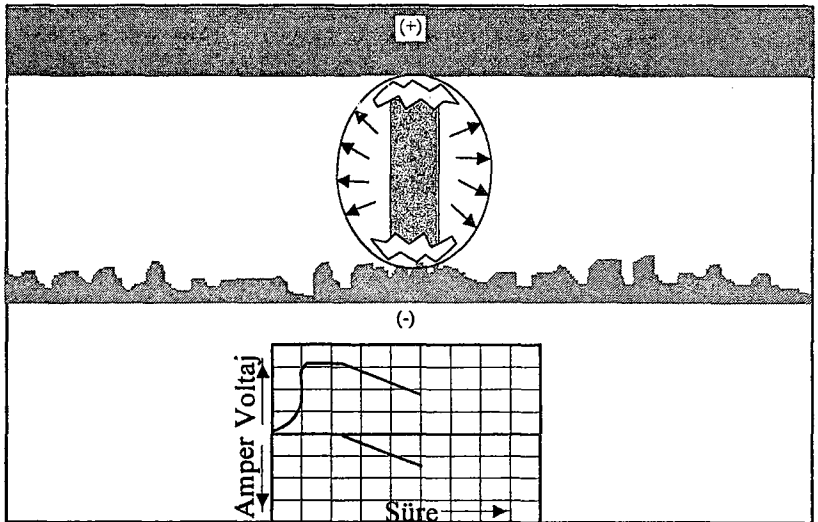
Akım artarken, hızlı bir ısı artışı meydana gelir ve voltaj düşmeye devam eder. Oluşan yüksek sıcaklık sıvının, iş parçasının ve elektrotun bir kısmını buharlaştırır. Elektrot ile iş parçası arasında bir boşalım kanalı oluşmaya başlar.



Şekil 2. 4 Talaş Kaldırma Sürecinde 4. Aşama.

5. Aşama

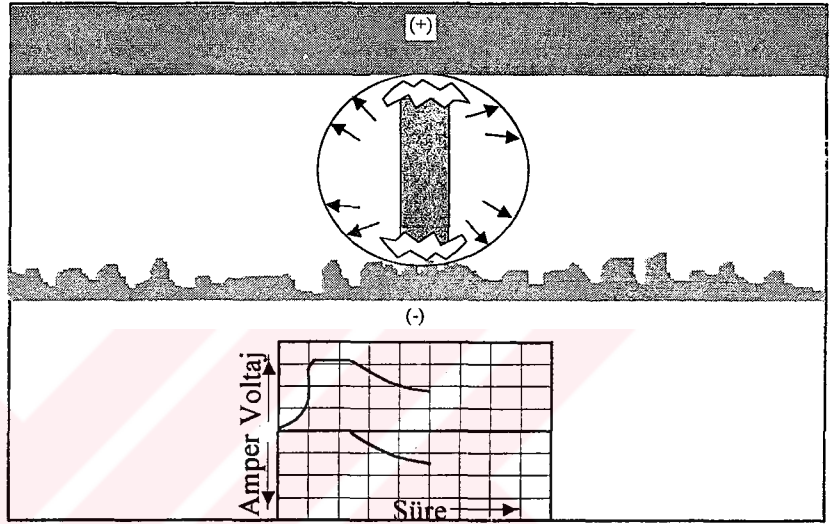
Akım boşalmasıyla oluşan sıcaklığın tesiri ile bir buhar balonu dışa doğru genişlemeye çalışır. Fakat dielektrik sıvısının baskısıyla ve boşalım kanalına doğru iyonların baskısıyla sınırlanır. Bu iyonlar, oluşan oldukça yoğun manyetik alan içerisine çekilirler. Akım yükselmeye devam eder voltaj ise düşer.



Şekil 2. 5 Talaş Kaldırma sürecinde 6. Aşama.

6. Aşama

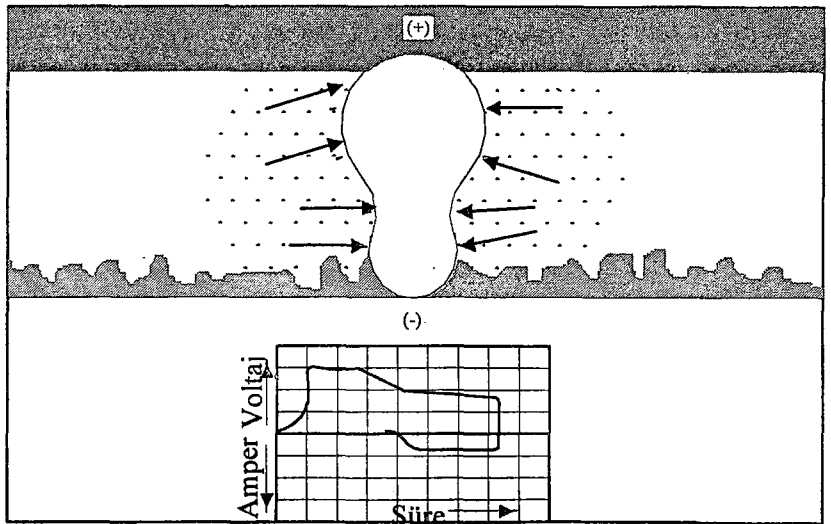
“Puls On” süresinin sonuna doğru akım ve voltaj dengelenir. Balonun içerisinde sıcaklık ve basınç maksimum düzeye ulaşır ve bir miktar metal kaldırılır. Metal, boşalım kanalı altında ergimiş haldedir ancak buhar balonunun tesiri ile yerinde tutulmaktadır. Boşalım kanalı bu aşamada yoğun bir akım ile buharlaşmış dielektrik sıvısı ve metalden oluşan yüksek sıcaklığa sahip plazmadan ibarettir.



Şekil 2. 6 Talaş Kaldırma Sürecinde 6. Aşama.

7. Aşama

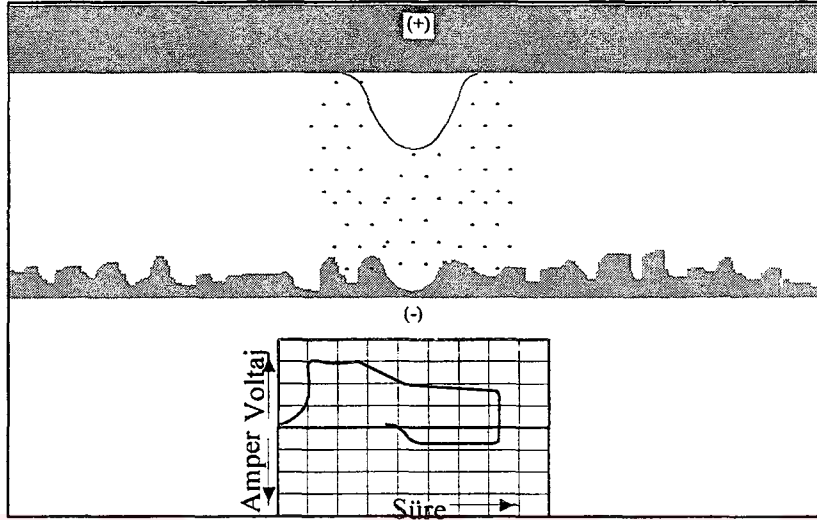
Off süresinin başlangıcında akım ve voltaj sıfıra düşer, buhar balonu söner ve iş parçasından ergimiş olan metal atılır.



Şekil 2. 7 Talaş Kaldırma Sürecinde 7. Aşama

8. Aşama

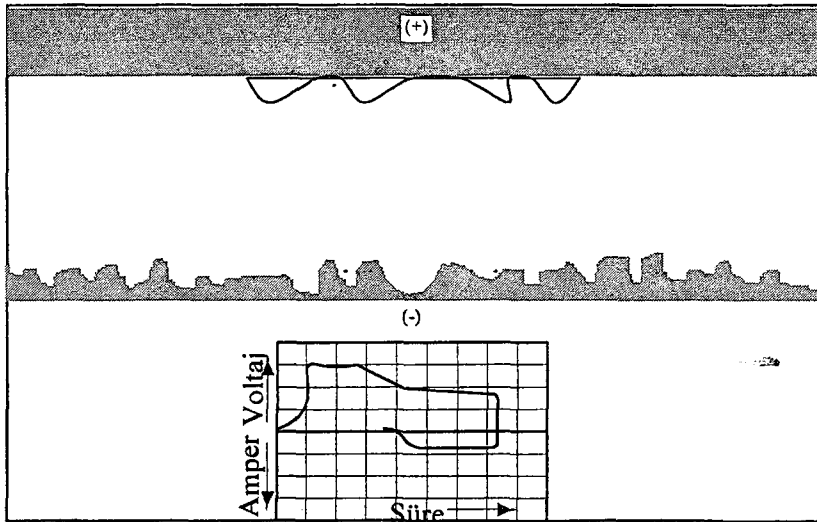
Dielektrik sıvı kıvılcım bölgesine hücum ederek iş parçasından ayrılan parçacığı, elektrotu ve iş parçasını soğutur.



Şekil 2. 8 Talaş Kaldırma Sürecinde 8. Aşama.

9. Aşama

İş parçasından ayrılan metal, dielektrik sıvı içerisinde küçük küreler şeklinde katılaşır. Bir miktar buhar yüzeye yükselir. Çevrimin sonunda, yeterli bir Off süresi ile kalıntıların ara bölgeden uzaklaştırılması sağlanır. Böylece iş parçasında ve elektrotta hasara yol açabilecek arklar önlenmiş olur.



Şekil 2. 9 Talaş Kaldırma Sürecinde 9. Aşama.
(www.uni.edu/nmrc/history/evolution.htm, 2001).

2.2. Başlıca Elektro Erozyon Çeşitleri

Yüksek tamlıkta metal işleme yeteneğine sahip olan ve çeşitli sanayi uygulamalarında mevcut olan bazı farklı Erozyon çeşitlerini aşağıdaki şekilde sıralayabiliriz ;

2.2.1. Elektro Erozyon (Electrical Discharge Machining) EDM

EDM, termal enerji kullanarak elektriksel boşalımlarla parçayı işleyen bir yöntemdir. Bu yöntemde yüksek tamlıklarda iş parçası elde edilebilir. EDM yöntemiyle bir insan saçının çapından daha küçük delikler bile işlenebilmektedir. Bu yöntemde iş parçası elektrik iletkenliğine sahip olmalıdır ve bir dielektrik sıvı ortamına daldırılmalıdır. Dalma Erozyon yönteminde takım elektrotu, iş parçasının yüzeyine bastırılarak işlem yapılmaktadır.

Tasarım ve uygulama alanları olarak her bir Erozyon yöntemi birbirinden farklı oldular da, talaş kaldırma mantığı olarak hepsinde elektro boşalımlarla işleme şekli standarttır. EDM sistemleri, ‘Die-Sinking’ yani Dalma Erozyon ve ‘Wire EDM’ (Tel Erozyonu) olmak üzere iki temel alana ayrılır. Dalma Erozyon yöntemi, aynı zamanda ‘Sinker’ (Dalma) ve ‘Vertical EDM’ (Dik İşlem Erozyon) olarak da adlandırılmaktadır.

2.2.2. Tel Erozyon (Wire Electrical Discharge Machining) WEDM

Bu yöntem, iş parçası boyunca lineer olarak hareket eden bir tel elektrotu yardımıyla, elektriksel boşalımlarla kesme işlemidir. Tel erozyonu yönteminde arzu edilir düzeyde iş parçasının imalatı için tel elektrotu ile iş parçası arasındaki kesme şartları, önceden hazırlanmış bir CNC programıyla kontrol edilmektedir.

WEDM, yaygın olarak kalıp ve kalıp parçalarının yanı sıra modellenmiş ceplerin imatı ve birçok değişik sanayi uygulamalarında kullanılmaktadır.

2.2.3. Freze Erozyon (Electrical Discharge Milling)

Bu yeni yöntem, bir freze çıkışı gibi kendi eksenini etrafında dönen bir silindirik elektrot yardımıyla elektro boşalımlarla şekil verme işlemidir. Dişi kalıp imalatında, istenen derinlik verilmek suretiyle kalıp çerçevesi ve iç kısım kolaylıkla işlenebilir. Talaş kaldırma şekli EDM yani Dalma Erozyona benzerdir. Freze Erozyonda standart silindirik elektrotlar kullanılarak, karmaşık elektrot tiplerinin imatları ve maliyetleri azaltılmıştır.

2.2.4. Taşlama Erozyon (Electrical Discharge Grinding) EDG

Dönel Erozyon olarak da bilinen bu Erozyon yönteminde, abrasiv taşlama taşı elektrik iletkenliği olan bir tekerlek, takım elektrotu olarak kullanılmaktadır. Taşlama yöntemine benzer şekilde elektro boşalımlarla iş parçası şekillenir. Bu yöntem, karpitler ve çeşitli elmas formları gibi kesici takımların bilenmesinde tercih edilmektedir. Bu yolla elmas taşların imalatındaki

fiyat oranı da azaltılmaktadır. EDG yöntemi U.S. ve Avrupa ülkelerinde daha çok yaygınlaşmıştır.

2.2.5. Ultrasonik Destekli Erozyon (Ultrasonic Aided EDM) UEDM

Bu yöntem, ultrasonik frekanslarla titreten bir takım elektrotu kullanılarak elektriksel boşalımlarla talaş kaldırma yöntemidir. Ultrasonik titreşim, küçük yada mikro düzeydeki deliklerin delinmesinde mükemmel bir işleme karallığı ve sürekliliği sağlar.

2.2.6. Mikro Elektro Erozyon (Micro Electro Discharge Machining) MEDM

Mikro EDM, Dalma Erozyonunun küçük bir şekli olarak ele alınabilir. Bu yöntemde takım elektrotu 10.000 rpm kadar döndürülerek V kanalları kolaylıkla işlenebilir. 5 mikrondan daha küçük elektrot çapları mevcuttur. Farklı şekillerin ve mikro deliklerin işlenmesinde kullanılır. Elektrotlar Tel Erozyonu olarak bilinen yöntemin aksine zıt kutuplu olarak yapılmışlardır. En yaygın olan Mikro Erozyon elektrotları 20 µm ila 250 µm arasında değişmektedir. Mikro Erozyonun en önemli üretim alanlarından bir tanesi de X-Y-Z eksenlerinde hareket eden bir CNC programıyla 1 µm toleranslı parçaları imal etmektir. Mikro EDM $\pm 1-2$ µm toleransında 10 µm ila 200 µm arasındaki delikleri delebilmektedir. Bu işlemin çok küçük ve hassas olması nedeniyle, MEDM uygulamaları mikroskopla incelenebilir.

2.2.7. Mikro Tel Erozyonu

Bu yöntemde çapı 10 µm kadar olan bir tungsten tel elektrotu kullanılır. Bu sistemle ölçüleri 0.1- 1 mm arasında değişen ince plakalar işlenmektedir. Bu makineler oldukça düşük enerji seviyelerinde kontrol edilebilen bir görüntüleme(monitör) sistemi, enerji jeneratörü ve hareket eden bir tel elektrotundan ibarettir.

2.2.8. Oyma erozyon (Mole EDM)

Bu yöntem iş parçasının içine doğru ilerleyen bir delik yada bir eğri olarak tanımlanmış bir yolda işlem yapabilme yeteneğine sahip bir sistemdir. Sistem, sanki yere bir tünel kazarcasına, parçayı işleyebildiğinden oldukça orjinaldir. Oyma Erozyon tezgahında kullanılan elektrotun şekli eğilebilen bir çubuk gibidir ve şekil hafıza alaşım malzeme kullanılmıştır. Bu yöntemde makine edilecek tünelin şekli ultrasonik bir dalgayla taranır. Bu sistem Japonya'da bulunan Tokyo Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mitsubishi elektrik laboratuvarlarında geliştirilmiştir (EDM Technology Transfer 2000).

3. TEL EROZYON YÖNTEMİ

Tel erozyon, geleneksel elektrik erozyonla işlemenin (EDM) özel bir şeklidir. Tel erozyonda kesme işlemine başlamak için hem telin hem de iş parçasının, elektriği yalıtan bir sıvı içerisine yerleştirilmesi gereklidir. İş parçası ve tel arasında bir elektriksel boşalım sağlamak için büyük bir voltaj aralık boyunca uygulanmalıdır. Uygulanan bu voltaj şu kriterlere bağlıdır;

- a) İş parçası ve tel arasındaki mesafe
- b) Dielektrik sıvısının yalıtma (yalıtım) kapasitesi
- c) Aralık (boşluk) kirliliği

Elektrot ve iş parçasından meydana gelen iki metale gerilim uygulanması, zıt kutupları oluşturur. Güçlü zıt kutupların etkisi ile pozitif ve negatif yüklü iyonlar çok kısa sürede yüksek hızla hareket etmeye başlarlar. Bunun sonucu olarak metaller arasındaki en yakın mesafe noktasında, elektrik akımının geçeceği bir ara kanal oluşur. Bir boşalım, en yüksek elektriksel seviye pozisyonunda yer alır. Bazı uygulamalarda kıvılcım sayısı 300.000'e kadar ulaşır. İzleyen aşamada gerçekleşen deşarj olayı, akım geçiş noktalarında 8000-12000 °C arasında yüksek bir ısının ortaya çıkmasına yol açar. Yüksek ısı, her iki metal yüzeyinde belirgin bir miktar bölgeyi sürekli olarak eritir. Ancak unutulmamalıdır ki elektrik direnci yüksek olan materyal daha fazla ısı etkisine maruz kalarak aynı oranda fazla aşınmaya uğrayacaktır. Eriyerek kopan parçacıklar, akımın kesilmesi ile hızla soğumaktadır. Bu aşamada soğuma etkisini destekleyen dielektrik sıvı, aynı zamanda metal partiküllerin kesim ortamından uzaklaştırılması görevini de üstlenmektedir. Dielektrik sıvıya karışan partiküllerden çökelmeyen bölümü ise artık madde olarak filtre aracılığı ile arıtılır. Sürekli olarak tekrarlanan bu olaylar zinciri, malzeme kesimi işlemini yerine getirmektedir.

CNC tel erozyon ile yapılan kesim sırasında tel ve iş parçasının aşınma oranları eşit ve simetrik değildir. Bu durum termal iletkenlik, materyallerin ergime sıcaklıkları, elektriksel deşarj yoğunluğu, tel besleme oranı ve özellikle kutuplaşma gibi etkenlere bağlı olarak karmaşık bir ilişkiler zinciri olarak tanımlanabilir.

Tel erozyon ile gerçekleşen iyi bir kesim işlemi, temel olarak aşağıdaki özelliklere ihtiyaç duyar,

- a) Elektrot (İş parçasına oranla) yüksek iletkenliğe sahip olmalıdır.
- b) İş parçası elektrik iletkenlik özelliği taşımalıdır. Ayrıca malzemenin cinsi, iletkenlik derecesi ve kesme yüksekliği kesim işlemini etkileyen faktörlerdendir.
- c) Dielektrik sıvı (saf su) yeterli yalıtkanlık derecesine sahip olmalı ve 18°C (ideal)'de korunmalıdır.
- d) Ortam sıcaklığı 20°C ve nem oranı %50 olmalıdır.

Ayrıca bunlara ek olarak akım jeneratörünün gücü, kararlılığı ve iyonlaşma etkisine adaptasyonu kesme işleminin verimi ile doğrudan ilişkilidir. WEDM uygulamalarında, günümüzde APT programlama dillerinin çeşitli versiyonları kullanılmaktadır. Bu şekilde daha az kalifiye elemana ihtiyaç duyularak ve minimum hata toleranslarında şekil geometrileri elde edilmektedir. Kullanılan bu dilde, operatöre yardımcı olmak amacıyla, iş parçası tanımlanırken diyaloglu veri girişi yöntemi uygulanmaktadır. Matematiksel hesaplamalar çok kısa sürede gerçekleştiğinden manuel hesaplamalarda geçen fazla zaman ortadan kaldırılmaktadır.

X ve Y eksenlerinde hareket edebilen ve dielektrik sıvı ile doldurulmuş iş tankı için öncelikle bir çalışma alanı belirlenmektedir. Daha sonra belirlenen bu alan dahilinde bir dosya adı altında programlanacak iş parçası, tanımlı geometrilere bölünür. Her bir geometri için bir numara verilerek profil belirlenir ve telin izleyeceği kesme yolu çizilir. Daha sonra işlem şartlarına uygun olarak tel çapı, malzeme cinsi, dielektrik sıvısının türü ve diğer kesme parametreleri belirlenir. En önemlisi, işlemden önce hataları görmek mümkündür. Aynı programda, matris ve zımbanın imalatı gerçekleştirilebilir. Tel ofset değerleri, matris ve zımba arasındaki kalıp boşluğu için kullanılır. Son zamanlarda bilgisayar destekli modellenmiş parçalar için CNC paket programları da kullanılmaktadır.

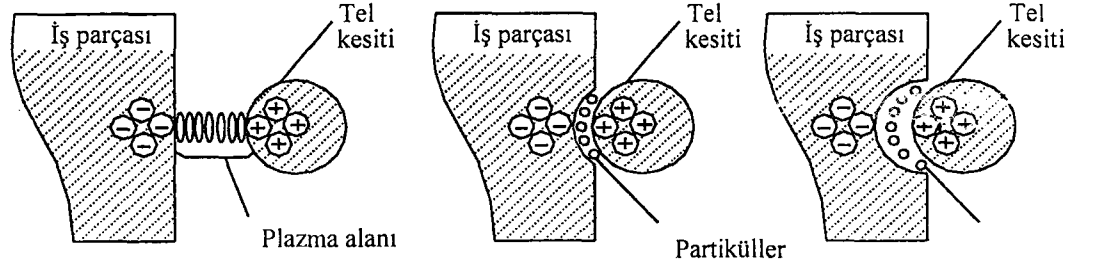
Genellikle kullanılan tel çapları 0.03 ile 0.3 mm arasındadır. İş tablasının yatay hareketi CNC vasıtasıyla kontrol edilir. Parçayı işlemek için hazırlanan program iki aşamadan meydana gelmektedir. Programın birinci aşamasında, iş parçasının geometrik şekli belirli oranlarla sınırlanmış bir koordinat düzlemi içerisinde, şekildeki her bir elemana nokta, daire, çizgi numaraları verilerek çizilmekte, ikinci aşamada ise kesme yolu yardımıyla esas şekil belirlenmektedir. Kesme işlemi başlatıldığında tel, kesme yolunu izleyerek kesme işlemini tamamlamaktadır (Ozangözü 1998, Savaş, Hasçalık, 2000)

Tel erozyon ile gerçekleştirilen kesme işleminde, yüksek ısı ile eritilerek aşındırılan yüzeylerde, mikron mertebesinde gözenekler oluşmaktadır. Hatta detaylı olarak incelendiğinde gözenekler arasında çatlakların oluştuğu görülebilir. Bunun nedeni, hep aynı yönde gerçekleşen iyonlaşma sonucunda ortaya çıkan elektroliz ve elektro-kimyasal korozyon etkileridir. Meydana gelen yüzey deformasyonu, erken aşındırma ve/veya kırılmalara yol açarak iş parçası ömrünü kısaltmaktadır. İmalatçı açısından ise gizli maliyet artışı olarak yorumlanabilir. (Makine- Metal, 2001).

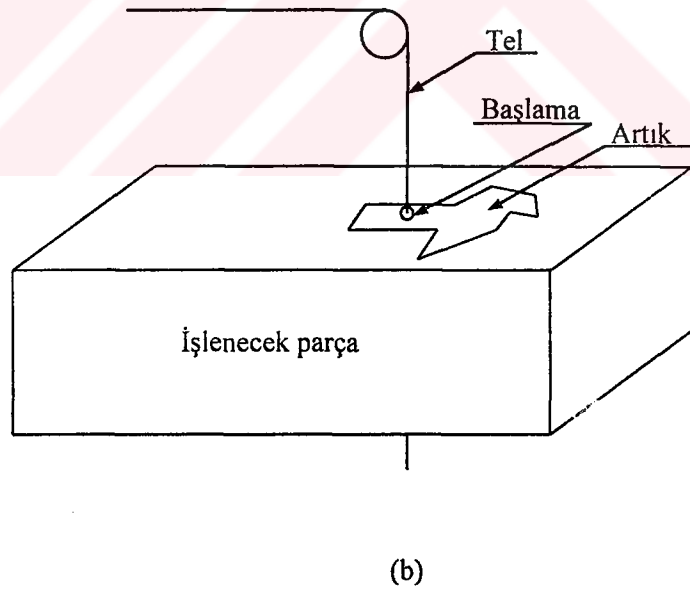
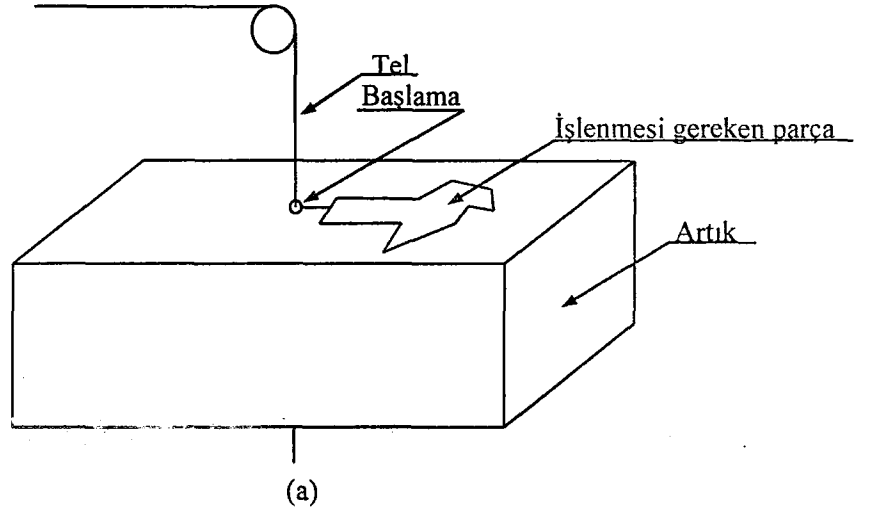
WEDM'nin ara kısımları; tel, iş tablası, kontrol ünitesi, güç kaynağı ve dielektrik kaynağıdır. Sayısal kontrol (NC) sistemli bir elektrik devresi, tel çapı düzeltme (wire diameter correction), ardışık kesme işlemleri vs. gibi fonksiyonları yapabilir. Tel ilerleme hızı, tabla hareketi, dielektrik sirkülasyonu ve güç gibi fonksiyonların tümü klavye vasıtasıyla kontrol edilebilir. Servo sistem NC takım tezgahlarının sürücü sistemidir ve genellikle bir elektrik

sürücü motoru ile çalışır. CNC pek çok makinanın çok yönlülüğü için büyük oranda etki eder ve hiç kuşkusuz yeni WEDM'lerde de standarttır (Scott Vd. 1991, Tosun 2001)

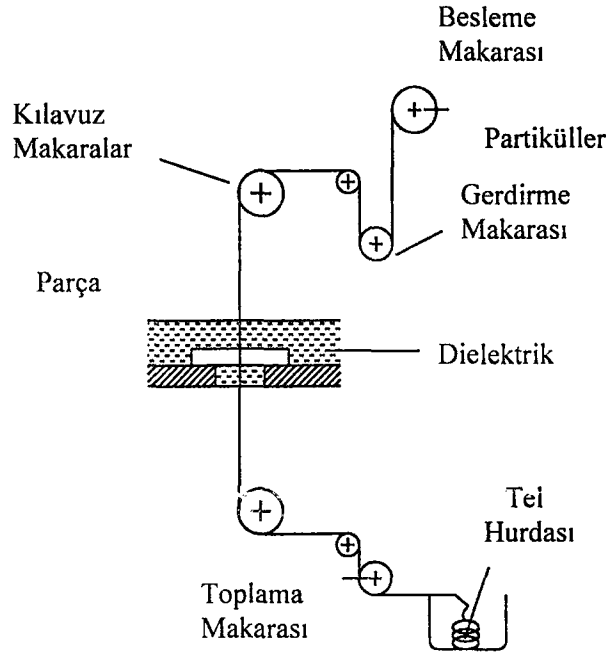
Genellikle kesme işlemine başlamak için başlangıç delikleri gereklidir. Eğer şeklin iç tarafı işlenecek ise başlangıç deliği iş parçasının dışına açılır. Bunun aksine, eğer şeklin dış yüzeyi işlenecek ise başlangıç deliği iş parçasının içine açılır. (Şekil 3.2)



Şekil 3. 1 Tel Erozyon ile Kesme İşlemi.



Şekil 3. 2 Başlangıç Deliğinin Pozisyonu.



Şekil 3.3 WEDM' nin Şematik Görünüşü.

3.1. WEDM'nin Tarihçesi

İngiliz fizikçi Priestly elektrik anahtarlarında meydana gelen kontak aşınmasıyla ilgili çalışmasında, kontak aşınmasının elektrik akımı ile doğrudan ilişkili olduğunu gözlemlemiş ve yaptığı deneyler sonucunda bu olayın akım şiddeti ve metal özelliğine bağlı olarak gerçekleşen bir aşınma olduğunu tespit etmiştir. 1770 yılında yapılan bu çalışma, erozyon teknolojisinin temellerini atmıştır. İleri tarihlerde ise kaşif ve Sovyet bilim adamı olan Boris Lazarenko elektriksel aşınma olayını kontrol altına alarak yapıcı olarak kullanabilme düşüncesini geliştirmiştir. Bu alandaki çalışmalar sonucunda 1943 yılında, elektriksel deşarj yolu ile metal işleyen makine (Electrical Discharge Machine – EDM) kavramı doğmuştur.

Boris Lazarenko, metal işleminde elektriksel kıvılcım metodunu geliştiren ilk kişiler olmalarına rağmen, elektro boşalımın makineciliğin temel teknolojisi dört İsviçreli tarafından atılmıştır. İsveçli arkadaşlar, kendi keşiflerinin endüstriyel potansiyelini fark ettiklerinden, bu teknoloji için bir garaj içerisinde birkaç yıl çalışma yaptılar. 1954 yılında İsviçreli bilim adamları çalışma yaptıkları çok amatör ve küçük olan garaj atölyelerini aşp Agie Corp şirketini kurdular. 1969 yılında WEDM, kurulan bu şirket tarafından dünyaya tanıtıldı. (Ozanözü 1998)

II. Dünya savaşındaki sonraki ilk yıllarda, iş parçasında olduğu gibi elektrot malzemesinde de aşınma gerçekleşmekteydi. Elle besleme mekanizması yüzünden, kıvılcımdan ziyade sürekli ark oluşumu meydana gelmekteydi. 1970'li yılların başlarında mikroprocessör'lerin bulunmasıyla, WEDM teknolojisi büyük oranda gelişme sağladı. 1975

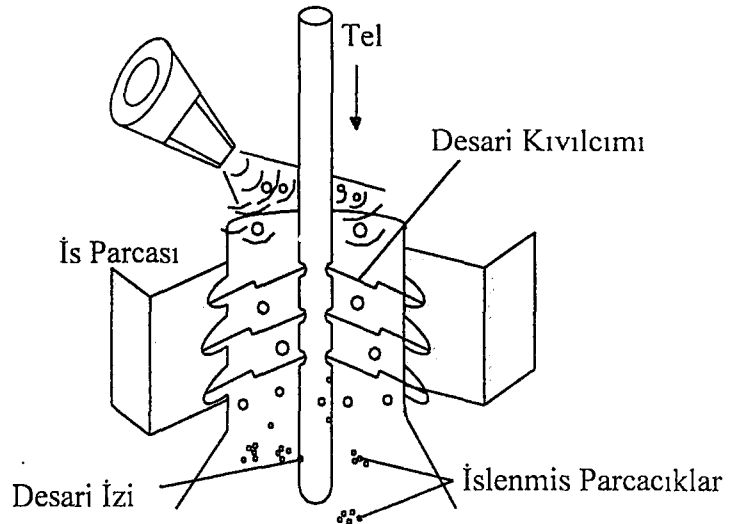
yılında kurulan şirket, WEDM için ilk ev mikroprocessor'ları geliştirildi. Tüm bu yenilikler, WEDM'ye oldukça esnek bir teknolojik avantaj kazandırmanın yanı sıra, takım uygulamalarında gerçekleşen operasyonların zamanında olması ve büyük bir zaman tasarrufu sağlamasıyla piyasada esnek bir yapı kazanmış oldu.

1980'li yıllardan önceki zamanlarda, yöntem yavaş olduğu için ve kesilen iş parçasının yüzeyinde değişiklikler ve bozukluklar olduğundan dolayı yöntem, havacılık sanayiinde pek popüler değildi. Ama 1980'lerden sonra yöntemin geliştirilmesiyle havacılık sanayiinin kullanılan başlıca yöntemi haline geldi.

1970'lerde Elektro-parlatma yönteminin gelişmesi ve 1980'li yılların sonlarında ise CNC'lerin kullanılmaya başlanmasıyla, WEDM'nin önemi önemli ölçüde artmış oldu. CNC makinelerinin yardımıyla karmaşık şekillerdeki üretim oranı arttı ve çok kompleks üç boyutlu karmaşık profiller işlenebilir hale gelmiş oldu. CNC'lerin kullanılmasıyla, çok eksenli WEDM makinaları yaygın hale gelerek tüm marketlerde müşteri için sunulmaya başlandı.

1980'lerin ortalarında, tel elektrotu teknolojisinin artması yüzünden WEDM makinelerinin kesme hızlarında da artış başladı ve verimlilik oranı büyük ölçüde artmış oldu.

Sonraki yıllarda WEDM sistemine bir akım kesme devresi ve servo-kontrolör eklenmesiyle iş parçası ile takım arasındaki mesafe bütün işleme boyunca sabit bir hale getirilmiş ve ark oluşumu önemli ölçüde engellenmiştir. Bu sistemlerin eklenmesi EDM yönteminde bir dönüm noktası olmuştur.



Şekil 3. 4 WEDM' de İşlem Mekanığı.

3.2. Tel Erozyon Tezgahının İşleme Parametreleri

SODICK A32OD/EX21 tel erozyon tezgahına ait kesme ile ilgili parametreler aşağıda ayrıntılı bir biçimde açıklanmıştır.

3.2.1. Puls Süresi (ON Time)

Tel Erozyon yönteminde, talaş kaldırma süreci Puls On süresinde gerçekleşmektedir. Bu safhada kıvılcım aralığı kurulmakta, akım oluşturulmakta ve iş yapılmaktadır. Yani, Puls On süresi her kıvılcımda tele uygulanan elektrik zamanının uzunluğunu kontrol etmektedir. Bu yüzden, daha yüksek bir seviyede Puls süresini ayarlamak daha büyük enerji üretimine sebep olur. Kullanılabilir özel ve değişik bir seri numaralara sahiptir. En düşük numara en kısa puls süresidir.

Puls süresi, tel için güç ekleyebilen bir faktördür. Puls süresi artırıldığı zaman, makine daha hızlı kesecek fakat yüzey daha pürüzlü olur ve doğruluk artan kesme hızından dolayı azalabilir. Genellikle, kaba işleme için puls süresi son pasodaki puls süresinden daha yüksektir. Eğer puls süresi aşırı büyük olursa tel kırılmaya karşı dayanıksız olacaktır.

3.2.2. Puls Ara Süresi (OFF time)

Bu parametre her bir kıvılcım arasındaki zamanın uzunluğunu kontrol eder. Bu yüzden, daha yüksek bir seviyede puls ara süresi parametresini ayarlamak daha büyük olan kıvılcımlar arasındaki zaman demektir ve daha düşük enerji üretimi ile sonuçlanır.

Puls ara süresi esnasında, parçacıklar, aralığın dışına püskürtüldüğünden çok önemlidir. Puls ara süresi EDM yönteminde yer almazsa tel iş parçasına değecek şekilde kısa devre yapar ve kırılır. Puls ara süresi, telden sürekli güç alan bir faktördür. Artan off time, genellikle daha yavaş kesme, artan süreklilik ve daha az tel kırılması anlamına gelmektedir genellikle puls süresi ve puls ara süresi yaptıkları etkilerinden dolayı bir arada göz önüne alınır. Puls ara süresi, puls süresinden daha düşük olmalıdır.

3.2.3. Puls Ara Süresi Ayarı (MA=Puls OFF duration adjustment)

MA parametresi adaptif kontrolün duyarlılığın ve miktarını kontrol eder. Makinanın adaptif kontrol devresi, kesme işleminin kötü olduğunu belirlediği zaman (malzemenin sert bölgesi, zayıf püskürtme, vs.), MA değerine bakar. MA iki sayısal numaradır. İlk rakam M, duyarlılığı kontrol eder. Daha düşük ilk rakam, adaptif kontrol sisteminin daha az duyarlılığıdır. Daha yüksek sayı, daha fazla duyarlılıktır. Bu demektir ki; MA için düşük bir ilk rakam (mesela 1), çalışma bölgesindeki probleme çok duyarlı olmayacak şekilde kontrol yapacaktır. 9 ayarı onu çok duyarlı yapacaktır. 1 ayarı iyi püskürtme ile kaba kesme yapılacağı zaman arzu edilir.

İkinci rakam A, puls ara süresi için daha fazla kontrol etmektedir. Kontrol, bir şeyin (M'ye dayanarak) yanlış olduğunu belirlediğinde, problem belirginleşinceye kadar MA'nın ikinci rakamındaki değer özelleşerek puls ara süresini artıracaktır. Daha sonra, normal ayarlarına geri döner. Puls ara süresi, parametre değişikliğini gerçek olarak görülmez, bu dahili olarak yapılır.

Mesela MA değeri 22 olsun. Bu durumda, duyarlılık oldukça düşük olacaktır ve eğer bir problem belirlenirse, puls ara süresi abartılı olarak değiştirilmez. Fakat MA değeri 89 olursa, duyarlılık çok yüksek olacaktır. Eğer bir problem belirlenirse, puls ara süresi problem çözülünceye kadar büyük bir miktar artırılabilir.

Bir problem halinde, tel programlanmış yolun verilen bir miktarı boyunca geri gider. Eğer problem çözülmezse, bir kısa devre alarmı ortaya çıkar. Eğer problem çözülürse, kontrol ileri doğru yönde tekrar çalışacaktır.

3.2.4. Yardımcı Güç Kaynağı Devresi (HP)

HP'nin iki rakamından birincisi olan H, artan açık aralık voltajını kullanan yüksek bir voltaj devresidir. Eğer DC elektrik arkı meydana gelirse, HP'nin son rakamı P puls süresi olur. P parametresi, MA parametresinin kesmenin kararsız olduğunu belirlediği zaman kullanır. Daha hızlı kesmek için yani tele daha fazla güç eklemek için bu değer artırılır.

IP 16'dan daha az bir değere ayarlanmadığı zaman, H parametresi yüksek voltaj devresini seçer ve normal olarak 0'a ayarlanır. Bu parametre kaba işleme için nadiren kullanılır. P parametresi, kararsız işleme esnasında oluşan EDM kıvılcımının devam etme süresini seçer. IP 15'den daha fazla bir değere ayarlanmadığı zaman P kullanılmaz.

3.2.5. Ana Güç Kaynağı Maksimum Akımı (IP)

IP akımının en üst noktası anlamına gelir. I akım için elektronik bir semboldür. IP tele uygulanan akım miktarını kontrol eder. Daha yüksek numaralar daha yüksek akım demektir. Bir EDM kıvılcım enerjisi; IP, V (ana güç kaynağı voltajı) ve puls süresi vasıtasıyla belirlenmektedir.

IP tele güç ekleyen faktörlerden birisidir. Puls süresi ile aynı derecede, daha yüksek IP, daha hızlı işleme hızı demektir. Fakat geometrik tamlik ve yüzey kalitesini düşürecektir.

3.2.6. Ana Güç Kaynağı Voltajı (V)

V voltajı tele güç ekleyen bir faktördür. IP parametresiyle birlikte deşarj puls enerjisini ayarlar. Tel için gerçek gücü ince ayarlamamanın bir yolu olarak puls süresi ve kaba bir ayarlama olarak da voltajı düşünebiliriz. Daha yüksek sayı daha büyük voltaj demektir.

Voltaj iş parçası kalınlığının bir fonksiyonudur. Kalın iş parçaları daha büyük bir voltaj, ince parçalar için daha düşük bir voltaj gerekmektedir.

3.2.7. Aralık Voltajı (SV)

SV servo voltaj anlamına gelir bu tel ve iş parçası arasındaki aralık voltajını ayarlar. Düşürülen bu ayar daha küçük bir aralık meydana getirir. Aşırı düşük değer kesmeyi kararsız yapar, çünkü parçacıklar aralık içinde kalır. Bu parametre kesme performansını ve aşırı yanmayı (overburn) kontrol eder bu parametre gerçek olarak tele güç eklemes. Eğer yüksek bir değere ayarlanırsa, kesme hızı yavaşlayacaktır.

3.2.8. Tabla İlerleme Hızı (SF)

SF servo ilerleme anlamına gelir. Bu tablanın maksimum ilerleme hızını ayarlar. SV ve SF kesme hızını artırır veya azaltan faktörlerdir. SF daima verilen bir iş parçasının gerçek bir şekilde kesebilecek makineden daha hızlı ayarlanmalıdır.

3.2.9. C (Kapasite)

C kapasitans anlamına gelir. Sodick WEDM Mark 21'de kapasitans çok gerekli değildir. Kapasitans tele daha fazla güç eklemenin bir yoludur. Sadece Mark 21 kontrol ünitesi üzerinde cüruf kesme esnasında kullanılır.

3.2.10. Tel Gerilmesi (WT)

WT otomatik bir tel çekici ile donatılan makinalarda tel gerilmesini ayarlar.

3.2.11. Tel İlerleme Hızı (VW)

VW otomatik bir çekici ile donatılan makineler üzerinde tel hızını ayarlar (Tosun, N 2002 , Tel Erozyon Katalogu Vol.1.4G).

3.2.12. Dielektrik Sıvısı

WEDM operasyonlarında dielektrik sıvısı oldukça önemli bir rol üstlenir. Tel ile elektro boşalımlarla kesme işleminde genellikle iyon değiştirerek yalıtkanlığını arttıran bir sıvı olan su, dielektrik olarak kullanılır. Dielektrik sıvısının başlıca görevleri ve bu sıvıdan beklentiler şu şekilde ele alınabilir ;

- a) İyi bir WEDM operasyonu için, iş parçası ve tel elektrotu arasındaki şartlar ve gereksinimler sağlanıncaya kadar, dielektrik sıvıları yalıtkan olmalı, daha sonra iletken bir özellik kazanmalıdır.
- b) Off-Time zamanında iş parçası ile elektrot arasında izolasyon sağlamalıdır.

- c) Isınan parçaları soğutmalıdır.
- d) Dielektrik, düşük viskoziteye sahip olmalıdır.
- e) Yüksek ısı transferine ve yüksek dielektrik direncine sahip olmalı ve oksitlenmeye karşı dayanıklı olmalıdır.

Dielektrik sıvıları olarak etilen, glikol emülsiyonları, özel katkılı gazyağları, petrol esaslı hidrokarbon, mineral yağlar ve di iyonize edilen su kullanılmaktadır. Şimdilerdeki WEDM operasyonlarında özellikle iki sınıf dielektrik sıvıları tercih edilmektedir.

a) Su

Diionize suyu WEDM yöntemiyle kullanılan bir dielektriktir. Su, yangın emniyeti, düşük maliyet ve düşük viskozite özelliklerinden dolayı tercih edilmektedir. Ayrıca küçük deliklerden ve çatlaklardan diğer dielektriklere göre daha akar ve daha iyi bir soğutma sağlar. Telde oluşan kıvılcım boşalımının oluşturduğu ısı, suyun termal iletkenliği nedeniyle hızlı bir şekilde yayılır. Su, kullanılmadan önce iyon değiştirme safhasından geçirilmelidir. (Scott vd. 1991)

b) Hidrokarbonlar

Yağlar ve gazyağları olmak üzere iki tip hidrokarbon, dielektrik sıvıları olarak kullanılırlar.

i) Yağlar

En yaygın kullanılan dielektrik sıvıları mineral yağlardır. Bu yağları kullanarak saptanabilecek en iyi sonuçlar, aroma ve diğer katkı maddesi içermeyen yağlarla sağlanır. Yağ viskozitesi önemlidir. Tel ve iş parçası arasındaki boşluklar çok dar olduğu için viskoz bir akışkan zorlukla sirkülasyon gerçekleştirebileceği için, yüksek viskoziteli yağlar WEDM operasyonları için uygun değildirler. (Ozanözü 1998)

Dielektrik olarak yağ kullanarak süper bir bitirme yüzeyi ve yüksek tamlıkta bir iş parçası elde edilebilir. Başka bir ifadeyle, pürüzlülük için yağın kullanımı önem arz eder. Yağ kullanarak tel ile kesme işleminde ;

- a) Oldukça hassas işleme sağlanarak, yüksek yalıtım direnci ve küçük boşalım aralığı,
- b) $1 \mu R_{Max}$ veya daha düşük oranda yüzey pürüzlülüğü,
- c) İş parçasının yüzeyinde, elektroliz etkisinden dolayı meydana gelen sertleşmiş form yada tabakanın en az olması,
- d) Çapı $0.03 \approx 0.1mm$ arasındaki teller kullanılarak, diğer dielektriklerle elde edilmesi imkansız olan hassas tamlık, elde edilebilir.

Ancak yinede, akışkanın alevlenme özelliğinden dolayı yağ kullanımı bir dezavantajdır ve dikkat gerektirmektedir.

ii) Gazyağları

Gazyağlarının düşük viskoziteleri nedeniyle, bu dielektrikler WEDM operasyonları için oldukça uygundur. Özellikle kısa boşalmanın gerekli olduğu süreçlerde, tungsten karbit işlemek için tavsiye edilirler.

3.2.13. Sirkülasyon Basıncı

Tel ile elektro boşalımlarla kesme anında, iş parçasından dökülen kırıntı ve katı metal partiküllerinin kıvılcım boşluğu boyunca hızlı bir şekilde akmasını sağlamak için kullanılan dielektrik sıvısına bir basınç verilmek zorundadır. Bu basıncın bir amacı da teli soğutmak olduğu için ve tel boyunca uygulandığından dolayı olası bir titreşimin oluşmaması için basıncın uygun ayarlanması gerekir. Sirkülasyon basıncı kullanılan Tel erozyon tezgahının kapasitesine göre değişik değerlerde ayarlanabilir.

3.3. Tel Erozyon Uygulamalarında Kesme Performansını Etkileyen Faktörler

Tel ile elektro boşalımlarla kesme işleminde, kesme performansına etki eden en önemli faktörler olarak kesme doğruluğu, kesme hızı ve iş parçasının geometrisinin programlanması gösterilmektedir. Bu üç faktörün, tüm kesim sırasında optimum performansta olması hem işleme zamanını azaltmakta hem de tel kopması olayını minimize edip kesmeyi kolaylaştıran şartları hazırlamaktadır. Ayrıca son yıllarda, endüstrideki gelişmeler doğrultusunda malzemelerin yüzey pürüzlülükleri WEDM için diğer önemli bir kriter olmuştur.

3.3.1. Kesme Doğruluğu

WEDM uygulamalarında, kesme doğruluğu hakkında birçok araştırma gerçekleştirilmiştir. Bu araştırmalardan biri olan Bradley' in çalışmaları doğrultusunda, EDM işleminden önce iş parçasındaki artık gerilmeleri gidermek için tavlama ve normalize etmek, ısı ve basınç hatalarını minimuma düşürerek ve kesme performansını yükselterek oldukça önemli pozitif sonuçlar doğurmuştur. Bradley' in önerileri doğrultusunda, daha yüksek kesme hızı boyunca yüksek kesme doğruluğu korunmalıdır. WEDM uygulamalarında normal problemlere ek olarak mutlaka dikkat edilmesi gereken potansiyel alanları aşağıdaki şekilde listeleyebiliriz;

- a) Kesme işlemi boyunca, tel çapı ile iş parçası arasındaki kesme genişliğinin sabit tutulması
- b) Telin uygun gerginliği
- c) Tel kılavuzlarının eksenel dengesi
- d) Tel titreşimini minimize etmek

Bununla birlikte, diğer birçok araştırmalarda tel eğilmesi ve kırılmasının kesme doğruluğunu etkileyen faktörler olduğu belirlenmiştir (Gökler, M.İlhan 2000).

3.3.2. Tel Eğilmeleri

Tel eğilmeleri, kesme doğruluğunu etkileyen önemli bir etkidir. Tel, kendi üzerinde rol oynayan ve kıvılcım oluşumunu gerçekleştiren elektro dinamik kuvvetler, elektro statik kuvvetler ve boşluktaki hidrolik kuvvetlerin etkisi altında iki ekseninde çekilmeye maruz kalır ve çekilme neticesinde kendisine uygulanan gerginlik oranını kaybeder. Bundan dolayı, değişik profildeki parçaların, örneğin bir eğrinin etrafı kesilirken, telin geride kalması iş parçası üzerinde geometrik bir hata oluşturur. Bu hata 100 mikron kadar olabilmektedir. Telin geride kalması, keskin köşe kesiminde bu köşelerin yuvarlatılmasına yol açar, böylece geometrik iş parçasının istenen şekilde çıkmasını engeller. Şekil 3.5 de telin gitmesi gereken yoldan sapmaları görülmektedir.



Şekil 3.5 Telin İzlemesi Gereken Yoldan Sapmalar.

Bu hataların çözümünün bulunması için çeşitli yollar denenmiştir. Bunlar, daha geniş tel germe kuvvetine uygun olarak tel germe direncini arttırmak veya uygulanan darbe gücünü düşürmek için çeşitli darbe parametrelerinin bir kombinasyonu ile köşe kesiminde kesme hızını düşürmektir. Ama kesme hızının düşürülmesi ekonomik bir yaklaşım değildir (W.J. Hsue, Y.S. Lio ve S.S. Lu 1997).

Son yıllarda, tel titreşim ve analizleri konuları geliştirilmektedir. Geliştirilen tel titreşimi ve analiz sistemlerinin ana fonksiyonları şunlardır ;

- a) EDM ile kesme esnasındaki ve telin boşta gezdirilmesi durumunda tel pozisyonunun ve yer değiştirmenin ölçülmesi
- b) Tel titreşiminin ölçülmesi esnasında, elde edilen verilere dayanan bir titreşim analizinin gerçekleştirilmesi

3.3.3. Tel Kırılmaları

WEDM’ de yüksek kıvılcım frekansı, işleme hızını arttırmaktadır. Ancak güç yoğunluğuna bağlı olarak telin kırılma riski de artmaktadır. Uygulamalarda, tel kopması olayı kesme performansını, işleme doğruluğunu ve yüzey kalitesini büyük oranda düşürmektedir. Birçok kesme şartlarında, bu durumun önüne geçmek amacıyla kıvılcım ara süresi (Off-Time) uzun tutulmaktadır. Fakat bu durum, tel kopmasını tamamen engelleyememekte ve işleme süresini de arttırmaktadır.

İşleme esnasında, seçilen iş parçasının yüksekliğine göre tel boyunun uzaması, güç yoğunluğunu arttırdığı için, teldeki ısı genleşme oranı da artmaktadır. Dolayısıyla tel kopma olasılığı da fazlalaşmaktadır. Farklı araştırmalarda, telin fiziksel özellikleri ve uygulanan tansiyon miktarı tel kopmasını etkileyen etkenler olarak göze çarpmaktadır. Burada uygulanan gerginlik miktarı telin gerilme direncinin yaklaşık % 50-60’ ına eşit olmalıdır.

Telin geometrik şekli, tel kopmalarındaki bir diğer faktördür. Pratikteki uygulamalarda genellikle silindirik teller kullanılmaktadır.

3.3.4. Kesme Hızı

WEDM’ de, seçilen parametrelere uygun olarak gerçekleştirilen kesme işlemi, diğer yöntemlere göre daha yavaştır. Kesme hızı da maliyet açısından önemli bir kriterdir. WEDM’ de kesme hızı kıvılcım boşalımının kontrolü ile ölçülebilir. Boşalım alanındaki enerji miktarını arttırmak, kesme hızını arttıran bir yol olarak görülse de, tel kopması riski kaçınılmaz olmaktadır. Bu da, hem işlenen parçanın yüzey kalitesini hem de işleme zamanını etkilemektedir.

WEDM’ de kesme hızı, birim zamanda kesilen iş parçası kalınlığı olarak düşünülmektedir. TSE Standartlarında 59 mm/saat olarak geçmektedir. Aynı zamanda kesme voltajı, amper, darbe genişliği, güç ve kapasite gibi faktörler de kesme hızını etkilemektedir. Uygulanan bu parametrelerle beraber, iş parçasının malzemesi ve kalınlığı, tel elektrotunun çapı ve fiziksel özellikleri, dielektrik sıvısının özgül direnci gibi etkenler de kesmeyi etkilemektedir.

3.4. Yüzey Pürüzlülüğü

Yüzeyler genellikle düzensiz ve karışık işlemlerle imal edilirler. Çoğu işlemlerde sıradan kontroller ve minimum kalite kontrolü ile genel yüzey doku gereksinimleri tam olarak karşılanamamaktadır. Çalışma şartlarına uygun olarak, bazı özel durumlar için yüksek mukavemet gerektiren, ağır basınçlara dayanabilen parçaların imalatı, genellikle özel ve detaylı yüzey kalitesine ihtiyaç duyar. Bu yüzden bu parçalar için, yüzey pürüzlülüğünün ölçülmesi ve kalite kontrolü gerekmektedir. Sürtünmeye karşı kullanılan yağlar ve yağlayıcılar, korozif ortamda çalışan makine elemanları, dönen makaralar, kaplanmış yüzeyler, bujiler, teleskop

lensleri vs... gibi birçok parçaların imalatları titizlik gerektirir.

Yüzey dokusu, 3 boyutlu yüzey topografisi şeklindeki nominal yüzeyden sapmalar olarak tanımlanabilir. İş parçasının profilindeki bu sapmalar, mekanik, optik ve elektronik devrelerin bir kombinasyonu ile ölçülebilir. Hiçbir zaman tam anlamıyla düzgün bir yüzey elde edilemez ve daima bir miktar pürüzlü doku kalır. Bu durum bitirme işleminde kalitesine göre biraz daha artabilir. Bazı yüzeyler hem pürüzlü hem de dalgalı olabilir. Yüzey dokusu dört elemandan oluşur. Bunlar ; pürüzlülük, dalgalanmalar, yataylık ve çatlaklıklardır.

a) Pürüzlülük

Pürüzlülük, üretim prosesinin tabiatında var olan düzensizliklerden oluşur. Bunlar takım izleri ve diğer ölçü dışı düzensizliklerdir.

b) Dalgalanma

Yüzey dalga durumu, bütün düzensizlikleri içerir; Pürüzlülük uzunluğundan büyüktür. Dalgalanma, makineden veya parçanın dönmesinden, titreşimden, ısıl işlemden, kesici takımın kırılmasından kaynaklanabilir. Pürüzlülük, dalgalı yüzeylerin üst üste gelmesiyle meydana gelir.

c) Yataylık

Yataylık, belirli bir yüzey bölümüne doğru kaymadır. Genellikle kullanılan üretim metodundan kaynaklanır.

d) Çatlaklıklar

Çatlaklıklar, istenmeyen ve kasıtsız düzensizliklerdir. Çatlaklık, bir bölgede veya yüzeydeki aralıkların değişimi ile gerçekleşir. Çatlaklar hava boşluğu, yükseltir ve kazıntılar içerir. Belirlenen bu özellikler olmadıkça, çatlakların etkisi yüzey pürüzlülüğünü aşırı derecede etkilemez. Yüzey pürüzlülüğünü bulmak için değişik yöntemler mevcuttur.

3.5 Tel Erozyon Yönteminin Uygulama Alanları

WEDM' nin bazı uygulama alanları aşağıdaki şekilde özetlenebilir.

3.5.1. Kalıp ve Kalıp Parçaları

Değişik WEDM makineleri kullanılarak kalıp ve kalıp parçalarının üretilmesi mümkündür. Kalıp işi, yüksek elektrot yüzey kalitesi ister. Bu ise genellikle WEDM yöntemi kullanılarak elde edilebilir. Dişi kalıp ve zımba yapımında çok kolaylık sağlar. Kalıplar üretilirken genellikle kopya torna uygulamaları kullanılır. Karmaşık parçalar için doğruluk ve ölçü tamlığı gerektiğinde, özellikle silindirik kompleks parçalarda dönen kopya torna tezgahları kullanılır. Bu kalıpların imalatı gerçekten çok yetenekli insan gücü gerektirir. Elektrik erozyonu teli, kalıpları doğru, çabuk ve yetenekli insan gücü gerektirmeden işleyebilir. Klasik tezgahlarla imalatı mümkün olmayan karmaşık profillerin kalıpları kolaylıkla kesilebilir. Bu yöntemde, kesme anında kalıplar iki parçaymış gibi düşünülebilir. Zımba ve kalıp aynı anda kesilebilir ve

zaman kaybına neden olmadan işlem süreci hızlanır. Tel, hesaplanan çerçevenin dışına yada başka bir noktaya ofsetlenebilir. Çerçevenin bir tarafındaki işleme zımbayı, diğer kenarındaki işleme ise kalıbı verir. Zımba ve kalıp için tek program yeterlidir.

3.5.2. Prototip İşlemi

WEDM işlemi kullanılarak karmaşık şekilli parçalar çabuk ve kolayca işlenebilir. Tabaka halindeki metal katmanları üst üste konularak tek bir pasoda yüzlerce ya da düzinelerce üretilir. Prototip işlemede WEDM'nin başka bir avantajı da yapılacak küçük değişikliklerle parçaların üretimleri için kullanılabilecek prototipi NC yardımıyla üretmektir. Bu yardım üretimi önemli derecede artırır.

3.5.3. Torna Takımları

Bazı torna takımları karmaşıktır, ayrıca yüksek oranda doğruluk gerektirir. Çelik bir gövde üzerinde lehimlenmiş karbürden oluşan torna takımları, genellikle pahalı elmas diskler kullanarak taşlanır. Çelik gövde genellikle frezelenerek hazırlanır. Daha sonra karbür bu çelik gövdeye lehimlenir ve form taşlama kullanılarak üretim işlemi tamamlanır. Bu özel torna takımları özel yapılmış WEDM makinalarıyla işlenebilir. Bu işlem iş parçası sabitken elektrotun aynı açıda sabit bir şekilde el ile uygulanmasıyla yapılabilir. WEDM içerisindeki özel programlar yardımıyla elips kesiminde bile kolaylık sağlar. Bu tür torna takımlarının imalatında WEDM kullanılarak önemli tasarruflar sağlanır.

3.5.4. Özel Şekil Malzemeleri

Karbür, elmas veya diğer standart olmayan malzemeler WEDM işlemi kullanılarak kesilebilir. Çoğu kez birçok alanda tercih edilen oluşturulan yeni malzemeler, geleneksel takım tezgahları kullanılarak ekonomik olarak kesilemezler. Özellikle sentetik elmaslar ve elmas bileşimlerini kesmek için çok sert ve pahalı olan kesicilere ihtiyaç duyulur. Bu maliyeti düşürmek için WEDM işlemi kullanılarak doğru, daha ucuz ve kısa zamanda kesme işlemi yapılabilir.

3.5.5. Broşlar

Broşlama (tığ çekme) aslında kama yuvası açmak için geliştirilmiştir. Bununla birlikte düz, iç ve dış silindir veya düz olmayan yüzeylerin seri imalatında kullanılır. Broşların silahlar gibi birçok uygulama alanları da vardır. Broşlar kullanılarak üretilen yüzey çeşitlerinde hemen hemen hiç sınırlama yoktur. Geleneksel yöntemlerle işlenen broşlar, pahalıya mal olur ve yüksek oranda kabiliyet gerektirir. Broşların üretiminde kullanılan malzemeler genelde sert

ve işlenmesi zordur. Bu zorluklar WEDM işlemi ile kolaylaştırılabilir. Broşlama takımlarının imalatı WEDM için mükemmel bir uygulama alanıdır.

3.5.6. Şablonlar

Şablonların tasarımındaki değişikliklere göre basit bir CNC programı yapılarak Tel erozyonunda bu parçaların işlenmesi oldukça kolaydır.

3.6. WEDM' nin Avantaj ve Dezavantajları

WEDM' nin önemli bir avantajı, tüm geleneksel olmayan işleme yöntemlerindeki gibi iş parçası ve tel elektrot arasında fiziksel bir temasın olmamasıdır. Bu makinelerle diğer tezgahlarda işlenemeyen temel kriterler aşağıdaki şekilde özetlenebilir;

- a) Geleneksel metotlar vasıtasıyla kolay işlenemeyen sert metal ve alaşımlarının işlenebilmesi. Böylece sertleştirilmiş çelikler, tungsten alaşımları ve farklı endüstri dallarında kullanılan döküm alaşımlarının işlenmesinde kullanılır.
- b) CNC kontrolü vasıtasıyla, otomatik olarak kompleks bir parçayı imal etmede kullanılır.
- c) Kesme anında bir kuvvete ihtiyaç duyulmaksızın iş parçası eritilerek işlendiğinden, bağlama zorluğuna sahip herhangi bir iletken parçayı işlemek oldukça kolaydır.

Çeşitli avantajlara olan WEDM işlemi birçok probleme de sahiptir. WEDM, çok sayıda parametre tarafından kontrol edilir. WEDM ünitelerinin karakteristiğinden dolayı, tek bir faktör bile sonuca etki edebilmektedir. Enerji hem kıvılcım yoğunluğu hem de zaman tarafından belirlenir. Bu parametreler, böylece hem işleme hızı hem de yüzey pürüzlülüğünü etkiler. Bunlar herhangi bir metal kesme işleminin çok önemli kabulüdür (Alekseyev ve Koremblum 1989, Hatschek 1984, Tarmykin ve Zlatkin 1967). Deşarj enerjisi, deşarj akımı, aralık voltajı, puls süresi, puls frekansı ve elektrot karakteristikleri tezgah parametrelerinin bir fonksiyonudur (Ricci vd. 1987). Bu parametrelerin ve diğer kontrol faktörlerinin yanlış ayarlanması, arzu edilmeyen yüzey hasarlarına ve düşük işleme hızlarına sebep olmaktadır (Tosun, 2000).

4. KONUNUN LİTERATÜRDEKİ YERİ

Bilimsel anlamda ilk sayılabilecek, 1889 yılında Paschen adlı bir araştırmacı tarafından çeşitli malzemelerin ark oluşum kabiliyetini belirleyen ve bu suretle önemli bir fiziki olaya açıklık getiren çalışmasından itibaren günümüze kadar bir çok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalardan güncel bazı örnekler aşağıda özetlenmiştir.

W.J. Hsue, Y.S. Lio ve S.S. Lu'nun yaptıkları çalışmalarda köşe kesiminde, WEDM'nin temel geometri bölümleri işlenmiş, tel merkezinin yörüngesindeki şekil değişimleriyle tel sapmasına göre, geometrik kesmede metal taşınma oranını tahmin edebilmek için bir model geliştirilmiştir (Hsue ve diğerleri,1997).

Z. N. Guo, T. C. Lee, T. M. Yue ve W. S. Lau'nun çalışmalarında da tel erozyonunun işleme mekanizmasını geliştirmek, daha iyi yüzey kalitesi ve kesme oranı sağlayabilmek için ultrasonik titreşim ile kesme oranının artışında kritik bir faktör olan enerji kullanımı daha büyük oranda sağlanmış ve doğru akım gücü altındaki tel elektrotunun dinamik karakteristikleri ile ultrasonik titreşimin akım noktalarının değişimini kolaylaştırdığı saptanmış ve akım ritminin kullanımını analiz etmek için istatistik bir deney düzeneği dizayn edilmiştir (Guo ve diğerleri, 1996).

Gökler. İ. Mustafa ve Ozanözü. M. Alp tarafından yapılan çalışmalarda ise tel erozyon işleminde kesilecek parçanın yüzey kalitesini istenen değerde elde etmek için en uygun kesme ve ofset parametreleri belirlenmiş, tel erozyon işlemi için maliyet hesabı analiz edilmiş ve kesim öncesi bir maliyet hesabı yapabilmek için çeşitli malzemelerden hazırlanan parçaların, çeşitli kesme ve ofset parametreleri kombinasyonu ile kesilmesi sonucunda birtakım tablo ve grafikler elde edilmiştir. Bu çalışmada tel ilerleme hızı ve dielektrik sıvı püskürtme basıncı tüm deneylerde sabit tutulmuştur (Gökler ve Ozanözü, 2000).

J. Prohaszka, A. G. Mamalis, N. M. Vaxevanidis'in çalışmalarında WEDM performansını özel olarak arttırmaya yönelik WEDM elektrotları için kullanılması gereken malzemeler incelenmiş, uygun tel elektrudu malzemesinin seçimi hesaba katılarak, WEDM'de makinalama üzerine bu malzemelerin etkisi araştırılmış ve birtakım deneysel sonuçlar elde edilerek tartışılmıştır (Prohaszka ve diğerleri, 1996).

M. Rozenek, J. Kozak, L. Dobrowski, K. Lubrowski'nin yaptıkları çalışmalarda, metal matris kompozit AlSi7Mg/SiC ve AlSi7Mg/Al₂O₃ nin WEDM işlemi boyunca yüzey sertliği ve işlem hızı üzerine işleme parametrelerinin etkileri deneysel olarak incelenmiş, WEDM metal matris kompozitlerinin işleme özelliklerinin genel olarak hangi şartlara bağlı olduğu araştırılmış, AlSi7Mg/SiC ve AlSi7Mg/Al₂O₃ kompozitlerinin maksimum kesme hızının Alüminyum alaşımlarının kesme hızından yaklaşık 6.5 kat daha düşük olduğu saptanmıştır (Rozenek ve diğerleri, 2001).

T. A. Spedding ve Z. Q. Wang tarafından yapılan çalışmalarda da ANN (Artificial Neural Networks) ve zaman serileri teknikleriyle WEDM'de yüzey özellikleri kullanılarak işleme modeliyle sürecin parametrik kombinasyonlarının optimizasyonu incelenmiş, yüzey yapısının unsurları periyodik olarak tanımlanmış ve bu tanımlanan unsurları belirtmek için otomatik bir yöntem geliştirilmiştir (Spedding ve Wang, 1997).

Dibinto ve arkadaşları yaptıkları çalışmalarda elektro erozyon (EDM) işlemi için basit bir katot erozyon modeli sunarak optimum puls zamanını tek bir noktada modelleyerek tahmin etmişlerdir (Dibinto ve diğerleri, 1989).

Allan. E. W. Rennie, Chris E. Bocking, Graham R. Bennett'in yaptıkları çalışmalarda da enjeksiyon kalıbı imalatında olduğu gibi, karmaşık şekilleri işleyebilmek için konvensiyonel yöntemle üretimi mümkün olmayan şekillerin erozyon yöntemi ile işlenmesi incelenmiş, kullanılan elektrotların bu işlemler için yeterli uygunlukta olup olmadıkları tartışılmış, hızlı prototiplerin üretilmesinde, yeni teknoloji kullanılarak elde edilen bazı elektrotların nispeten verimli olmalarına rağmen yeterli olmadıkları saptanmış ve küçük cidarlı bakır elektro formlarının uygun dolgu malzemeleri ile doldurulmasıyla elde edilen malzemenin kullanımının ideal olduğu sonucuna varılmıştır (Rennie ve diğerleri, 2000).

Çoğun ve Savsar ise yapmış oldukları çalışmalarda elektro erozyondakideşarj pulslarının özelliklerinin istatistiksel modellemesini yapmışlar, puls süresi, puls ara süresi vedeşarj akımı gibi farklı işleme şartlarındadeşarj pulslarının gecikme sürelerinin rasgele davranışlarını incelemişlerdir (Çoğun ve Savsar, 1990).

J. C. Rebelo, A. Morano Dias, D. Kremer ve J. L. Lebrun tarafından yapılan çalışmalarda da malzemenin operasyonel davranışlarını belirleyen iş parçası ve elektrot arasındaki metalin yapısındaki değişiklikler, artık gerilme basınçları ve kırılmalarda önemli olan ısıl değişiklikler dikkate alınarak, yüzey tamlığını incelemek için farklı deneysel araştırma sonuçları kullanılmış, yüzey pürüzlülüğü, malzemenin metalurjik yapısı ve yakın yüzey katmanlarının yüzey kırılma ağı ana işleme parametrelerine bağlı olarak incelenmiş, nitelik ve nicelikleri tartışılmıştır (Rebelo ve diğerleri, 1997).

Spur ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, çok kristalli elmas (PCD=Polycrystalline diamond) kesici takım malzemeleri üzerinde kesme testleri yapmışlardır. Farklı amaçlar için tel malzemelerinin seçimi ve elektro erozyon makinalarının otomasyonu tartışılarak tel erozyonunun gelecekte belirli bir süreç içerisinde aşırı potansiyele sahip bir büyümeye aday olduğu vurgulanmıştır (Spur ve diğerleri, 1988).

Bogdan Nowicki, Robert Pierzynowski, Slawomir Spadlo'nun çalışmalarında kompleks biçimli parçalarda, yüksek verimlilik isteyen parçalarda ve işlem otomasyonunda kolaylıklar sağlayan aynı zamanda uygulanmış işleme şartlarına bağlı olarak malzemeyi taşımak için

kullanılabilen, dönen bir fırça üzerine yerleştirilmiş tellerden oluşan elektrotlarla yapıyı yeni bir yöntem kullanmışlardır. Kullanılan bu fırça tipi elektrotlar yumağının yüzeye elastik bir baskı uygulayarak hassas işleme şartlarını sağladığı belirlenmiştir (Nowicki ve diğerleri, 2001).

Williams ve Rajurkar ise yaptıkları çalışmalarda tel erozyon ile oluşturulmuş yüzeylerin karakteristiklerini sunmuşlardır. Yüzey pürüzlülük profilleri, işleme mekanizmasının daha iyi anlaşılabilmesi için analiz metodolojisi ve tahmini bir model geliştirmişlerdir (Williams ve Rajurkar, 1991).

Y.S. Lio ve J. C. Woo'nun çalışmalarında güç tüketimi ve kısa devre oranı, kontrol parametreleri olarak seçilmiş, puls analizleri ve deneyleriyle birleştirilerek WEDM işleminin kontrolü için Fuzzy kuralları formüle edilmiş, bir DSP odaklı online puls görüntüleme (ölçme) sistemi geliştirilip bir bilgisayarda uygulanmıştır. Kontrol sistemini geliştirmede önce referans bir güç düzeyi belirlenmiş ve mevcut makine gücüne göre hız ayarlanmıştır. Bitiş zamanı otomatik olarak ayarlanabilen ve bu yüzden de kısa devre oranı belli bir değeri geçmeyen puls Off-Time'in ve hızın uygun bir şekilde ayarlanması, toplam ateşlemenin gecikme zamanını kontrol altına almıştır. Elde edilen deneyler, tel erozyon makinalama işleminin kontrolü için geliştirilen Fuzzy kontrolünün dizaynı ile yapılan çalışmaların diğer konvensiyonel kontrol planına kıyasla çok daha doyurucu olduğunu göstermiştir (Lio ve Woo, 2000).

Banerjee ve arkadaşları deşarj kanalındaki sıcaklık dağılımını göz önüne alarak basit bir sonlu fark ısı modelini kullanarak deşarj kanalındaki sıcaklık dağılımını ve bu dağılımın sonuçlarından yola çıkarak da tel kopmasını incelemişlerdir. Yapılan bu çalışmada değişik giriş gücü, puls süresi, tel ilerleme hızı ve tel çapı gibi parametrelerin etkileri araştırılmıştır. Çalışma sonucunda artan güç ve puls süresi ile deşarj kanalı yarıçapının büyüdüğü ve dolayısı ile sıcaklığın da arttığı vurgulanmış, tel ilerleme hızının etkisinin ise güç ve puls süresine nazaran çok az miktarda olduğu belirtilmiştir (Banerjee ve diğerleri, 1993).

Y.S. Liao, M.T. Yan, C.C. Chang'ın yaptığı çalışmalarda ise tel erozyonu işleminde, işleme şartlarını ayırt etmek ve iş parçası yüksekliğini tahmin etmek için bir ileri besleme nöral ağ kullanılarak bazı deneyler yapılmıştır. Optimal ve sabit işlemeyi sürdürebilmek için bir strateji belirlenmiş, ve bu stratejiye göre, servo voltaj ve güç ayarları iş parçasının profiline uydurulmuştur (Liao ve diğerleri, 2000).

Yong Li, Min Guo, Zhaoying Zhou, Min Hu yapmış oldukları çalışmalarda bir tel erozyon öğütme ünitesi, mikro elektro erozyon jenerasyonu için bir RC devresi ve işleme sürecini kontrol etmek için kullanılan bir alt sistem kombinasyonları ile bir mikro elektro erozyon prototipi geliştirmişlerdir. Geliştirilen mekanizmanın dizaynında, itme kapasitesini artırmak için güç büyütme yapısıyla yeni bir kenetleme mekanizması kullanılmıştır. Yapılan mekanizmada; shaftın genişliğiyle sınırlı olmak üzere 60 mm strok boyu, 2µm'den daha az

sapmaya sahip ve 30 N itme gücüne ulaşılmıştır. Deneylerde paslanmaz çelikler ve silikon malzemeler kullanılmış ve kullanılan bu malzemeler üzerindeki mikro yapılarda elde edilen sonuçlar tartışılmıştır (Li ve diğerleri, 2001).

Yoshihisa Matsumoto, Sin Ohta, Noriyuki Aoki ve Masahiko Morinaga'nın çalışmalarında yüzey parlatma yöntemi kullanılarak kromun tel haline getirilebilirliği üzerindeki çevresel etkiler araştırılmıştır. Ve parlatılmış kromun tel haline getirilmesi olayının mekanik olarak su içinde oldukça önemli boyutta gerçekleştiği saptanmıştır. Fakat aynı şartlar altında elektronik olarak parlatılmış kromun aynı sonuçları vermediği gözlenmiştir. Sudaki bütün testlerde, yükleme oranı azaltılınca tel haline getirilebilirliğin de belirli bir oranda azaldığı saptanmakla beraber krom'un tel haline getirilebilirliğinin sonuç olarak yüzey karakteristikleri ve test çevresi arasındaki etkileşimin bir sonucu olduğu belirtilmiştir (Matsumoto ve diğerleri, 2001).

Tarn ve arkadaşları WEDM'de kesme performansının iyileştirilmesi amacıyla yaptıkları çalışmada, iş parçası olarak paslanmaz çelik kullanmış ve işleme hızı ve yüzey pürüzlülüğü için yapay sinir ağları kullanılarak, puls süresi, puls ara süresi, gerilim, servo voltaj, deşarj akımı, kapasite ve tabla ilerleme hızının optimum değerlerini belirlemiş ve ayrıca gerilim, deşarj akımı, puls süresinin artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün arttığı belirtilmiştir (Tarn ve diğerleri, 1995).

Scott ve arkadaşları tel erozyonundaki kesme parametrelerinin, işleme hızı ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri için, bir optimizasyon çalışması sunmuşlardır. Çalışmada puls süresi, deşarj akımı ve tel ilerleme hızı arttıkça yüzey pürüzlülüğü artmış ve dielektrik sıvı püskürtme basıncının artması ile yüzey pürüzlülüğü azalmıştır (Scott ve diğerleri, 1991).

Liao ve arkadaşları WEDM işlemi için işleme parametrelerinin uygun seçimiyle alakalı bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada parametre ayarlarını belirlemek için bir yaklaşım önerilmiştir. Kalite dizayn yöntemi ve varyans analizi üzerine kurulu bu yöntemde, talaş kaldırma oranı, boşluk genişliği, yüzey sertliği, kıvılcım sıklığı, toplam boşluk voltajı ve normal oran gibi işleme performansını etkileyen önemli faktörleri belirlemişlerdir. Regresyon analiziyle, işleme performansı ile ilgili matematiksel model ve çeşitli makine parametreleri oluşturulmuştur. Matematiksel model üzerine kurulu, çoklu baskı şartları altında bir amaç fonksiyonu formülize edilmiştir. Optimizasyon problemi çözülmüş ve optimal işleme parametreleri elde edilmiştir (Liao ve diğerleri, 1996).

Tosun, N ise yapmış olduğu araştırmada WEDM yönteminde kullanılan tellerde meydana gelen aşınmaları deneysel olarak incelemiş, telde oluşan krater boyutlarını tespit etmiş ve yüzey pürüzlülük değişimini incelemiştir (Tosun, 2000).

Konuyla ilgili yapılan literatür taramasında çalışmaların daha çok işlem parametrelerinin etkinliği, iş parçası yüzey pürüzlülüğü ve tel aşınması üzerinde yoğunlaştığı

ancak işlem parametrelerine bağılı olarak iş parçası malzemesinde meydana gelen mikro yapı değişimlerinin yeterli incelenmediğı görülmüştür.

İncelenen literatürler doğrultusunda, bu çalışmada D5 takım çeliğı ve alüminyum malzemelerinden oluşan numuneler üzerinde farklı kesme parametreleri uygulanarak kesme işlemi yapılmıştır. Kesme işlemi sonunda mikroyapıda meydana gelen değişimler optik ve SEM mikroskobu ile incelenmiş, mikrosertlik ve yüzey pürüzlülük değerleri tespit edilmiştir. Uygulanan deney şartları içerisinde elde edilen sonuçlar tartışılarak yorumlanmıştır.



5. DENEY ÇALIŞMALARI

5.1. Çalışmanın Amacı

Tel Erozyon esas olarak Elektro-Termal bir yöntemdir. Tel Erozyon yöntemiyle kesme işleminin mekaniği, dielektrik sıvı ortamında şiddetli elektron çarpışmaları, yüksek basınç ve ısı gibi faktörlerin de etkisiyle oldukça karmaşık ilişkiler kombinasyonuna dayanmaktadır. Tel erozyon yönteminin talaş kaldırma mekanizması, henüz tam olarak anlaşılamamıştır. Çünkü yöntemde, OFF süresi, ON süresi, tabla hızı, tel hızı, iş parçası özellikleri (malzeme cinsi, kalınlığı) vb. birçok parametre aynı anda etki etmekte ve bu faktörlerin izafi tesirleri yöntemin tam olarak anlaşılmasını zorlaştırmaktadır (Liao and Woo, 1997). Bundan dolayı WEDM işleminde uygun parametre seçimi genellikle imalatçı firma tarafından önerilen şartlarda ve kullanıcı tecrübelerine dayanılarak yapılmaktadır (Liao, Huang and Su, 1997).

İşlenen bir makine elemanının yüzeyinin, mikro ve makro düzeyde kalitesi, o makine elemanının performansı ile doğrudan ilgilidir. Teknolojinin gelişmesi ve çeşitlenmesi sonucu yapı elemanlarından boyut hassasiyetlerinin yanı sıra sıcaklık, korozif etkiler, aşınma ve çeşitli yük ve momentlere karşı dayanım gibi beklentiler artmaktadır. Örneğin, bu faktörler arasında dinamik yükleme birçok modern yapıların tasarımında temel bir faktördür ve malzemelerin yorulma karakteristikleri ile sınırlıdır. Dinamik elemanların hasar analizleri ve çalışma süreçleri yorulma hasarlarının genellikle yüzey ve yüzeye yakın bir noktadan başladığını ortaya koymaktadır. Bu ve buna benzer nedenlerden dolayı, makine elemanlarının yüzey karakteristiklerine daha fazla önem verilme gereği ortaya çıkmaktadır.

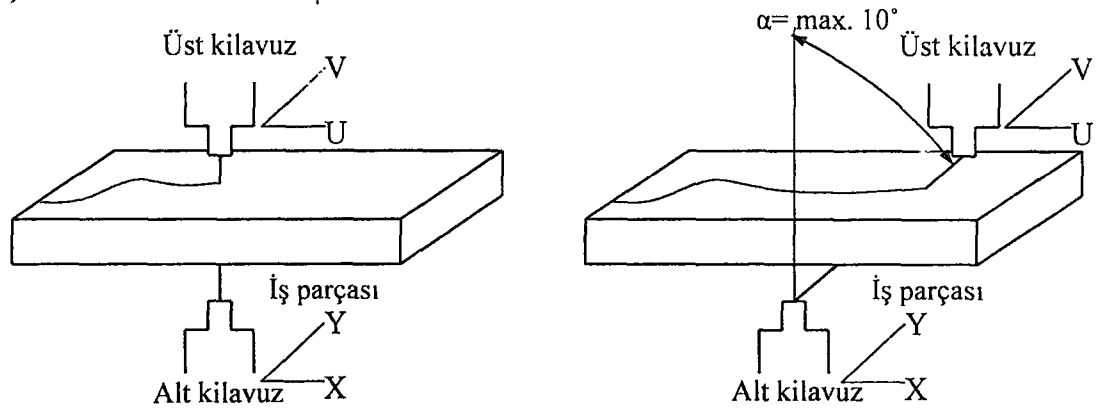
Herhangi bir makine elemanı, klasik veya klasik olmayan imalat yöntemleriyle işlenirken, dikkat edilmesi gereken ilk husus boyutsal hassasiyetin yanı sıra yüzey özelliklerinin ihtiyaçlara uygun olmasıdır. Yüzey yapısı, iki açıdan ele alınabilir. Birincisi; yüzey pürüzlülüğünü de kapsayan yüzey geometrisi, ikincisi ise talaş kaldırma esnasında malzemenin yüzey tabakalarında meydana gelen gerilme şartları ve metalurjik değişikliklerdir. Bu değişikliklerin başlıca sebepleri, yüksek sıcaklıklar, plastik deformasyon, kimyasal reaksiyonlar, aşırı elektrik akımları veya yöntemdeki aşırı enerji yoğunlukları olabilir. Bunun sonucu olarak, plastik deformasyon, mikro ve makro düzeyde çatlaklar, rekristalizasyon, sertlik değişimi, faz dönüşümleri, artık gerilmeler olarak özetlenebilir.

Yukarıda belirtilen gerekçeden hareket ederek, bu çalışmada özellikleri farklı iki malzeme kullanılarak, değişik kesme parametrelerine bağlı olarak malzeme yüzeyinde meydana gelen pürüzlülük ve mikro yapı değişiminin incelenmesi amaçlanmıştır. Ayrıca, uygun parametre seçiminin genellikle kullanıcı tecrübelerine bağlı olduğu dikkate alındığında, bu çalışmanın sanayideki uygulamalara da yardımcı olacağı düşünülmektedir.

5.2. Deneylerde Kullanılan Tel Erozyon Tezgahının Özellikleri

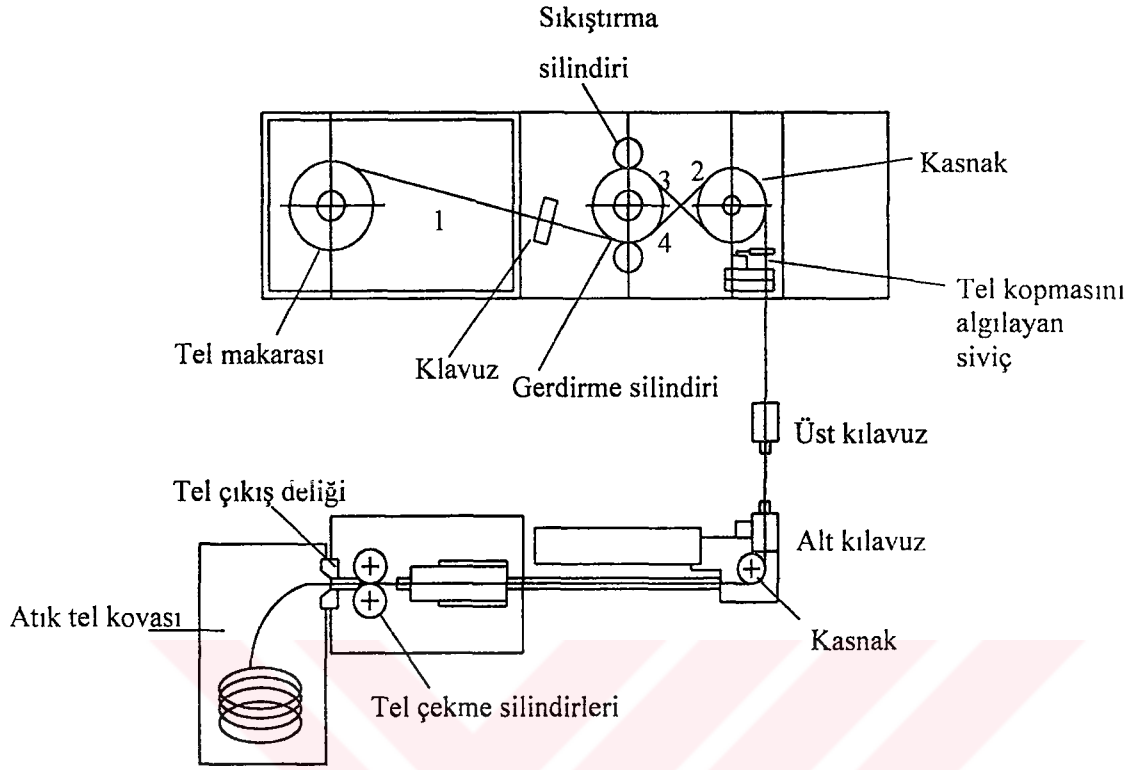
Deneyisel çalışmalar, Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümü CNC laboratuvarındaki SODICK firmasına ait A32OD/EX21 Tel Erozyon tezgahında yapıldı. Bu tel erozyon tezgahının teknik özellikleri aşağıdaki gibidir: Şekil 5.2’de deneylerde kullanılan tel erozyon tezgahının şematik görünüşü, Şekil 5.1’ de ise tezgahın hareket eksenleri ve kılavuz açısı durumu gösterilmektedir.

- a) CNC kumandalı
- b) 1/1000 mm hassasiyetli
- c) Tabla hareketi : (max) X = 320 mm Y= 205 mm
- d) İşlenebilecek kalınlık: (max) Z= 150 mm
- e) Koniklik açısı: 10 derece (max)
- f) Tel ilerleme hızı: (max) 250 mm/sn
- g) Tel çapları: 0.1, 0.25, 0.3 mm
- h) APT ile programlama
- i) Tabla ilerleme hızı: 2 – 40 mm/dak
- j) Aralık voltajı toleransı: 0 – 31 volt
- k) Tel tansiyonu: 380 – 2200 gr
- l) Dielektrik sıvı sirkülasyon basıncı: 6 – 24 kg/cm²
- m) Ana güç kaynağı voltajı: 60 – 270 volt
- n) Ana güç kaynağı maksimum akımı: 0 – 17 amper
- o) Yardımcı güç kaynağı devresi (HP): H = 0 – 9 , P = 0 – 4
- p) Puls ara süresi ayarı (MA): M = 0 – 9 , A = 0 – 9
- q) Puls ara süresi: 1 µs – 25 µs
- r) Puls süresi: 100 ns – 1 µs



α : Kılavuz koniklik açısı

Şekil 5.1 Tezgahın Hareket Eksenleri ve Kılavuz Açısı Durumu.



Şekil 5.2 Tel Erozyon Tezgahının Şematik Gösterilişi.

5.3. Deneylerde Kullanılan Malzemeler

Tel erozyon yönteminin esas olarak elektro- termal bir süreç olduğu dikkate alınarak, deney çalışmalarında ergime, ısı ve mekanik özellikleri farklı iki malzeme kullanılmasına karar verilmiştir. Bunun için tel erozyon tezgahlarının daha çok kalıpcılıkta kullanıldığı düşünülerek; soğuk şekillendirme, kesme, bükme, çekme vb. kalıpların yapımında yaygın olarak kullanılan D5 takım çeliği ve ergime sıcaklığı düşük, ısı iletkenliği yüksek olan ve birçok kullanım alanının yanı sıra son yıllarda plastik enjeksiyon kalıplarında da kullanılan alüminyum alaşımı seçilmiştir. Sanayiden temin edilen Al alaşımlı malzemelere herhangi bir işlem uygulanmamıştır. Bu iki malzemeye ait kimyasal bileşimler Tablo 5.1 ve 5.2' de verilmiştir.

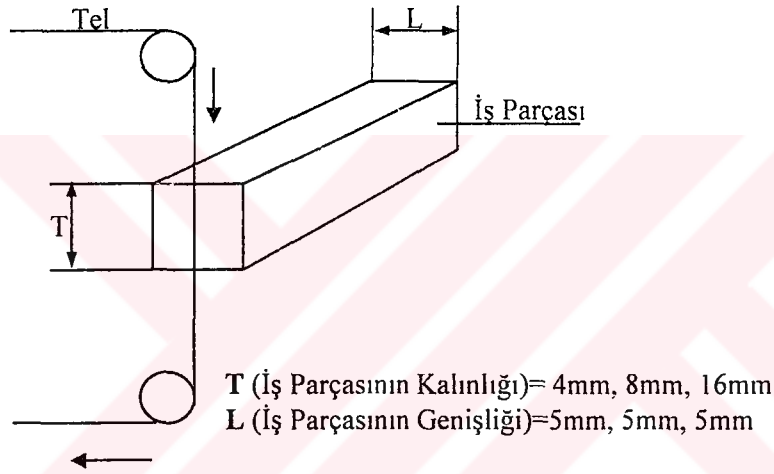
Tablo 5.1. Deneylerde Kullanılan D5 Takım Çeliğinin Kimyasal Analizi.

C	Si	Mn	Cr	Mo	Fe	Ni
1.53	0.895	0.460	12.00	1.00	83.7	0.384

Tablo 5.2. Deneylerde kullanılan alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi.

Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg
93.22	5.6	0.8	0.27	0.06	0.05

Deneylerde uygulanan parametrelere bağlı olarak, kesme alanının da etkisini belirleyebilmek amacıyla, malzemeler sırasıyla 4mm, 8mm ve 16mm kesme kalınlığı olacak şekilde 20 mm², 40 mm² ve 80 mm² kesme alanına sahip, dikdörtgen kesitli çubuklar halinde işlenerek, kesme işlemine hazır hale getirilmiştir.



Şekil 5.3 Deneylerde Kesilen İş Parçalarının Ölçüleri.

Takım çeliğinden hazırlanan numunelerin bir kısmına ısıtma işlemi uygulanarak farklı sertlik ve mikroyapının etkisi tespit edilmeye çalışılmıştır. Bunun için numuneler, 850 °C'de yarım saat tavlandıktan sonra yağda soğutulmuştur. Daha sonra, 300 °C'de 4 saat temperleme işlemine tabi tutulmuşlardır. Alüminyum alaşımından hazırlanan numunelere ise, herhangi bir işlem uygulanmamıştır.

5.4. Deney Yöntemi

Deneylerde Puls süresi, Dielektrik sıvı sirkülasyon basıncı, tel ilerleme hızı ve gerilim parametreleri değişken olarak alınırken; tabla ilerleme hızı, tel gerginliği, puls ara süresi ve tel çapı sabit olarak alınmıştır. Dielektrik sıvı olarak su kullanılmıştır. Kesme işlemlerinin hepsinde çekme mukavemeti 900 N/mm² olan 0.25 mm çapında CuZn37 Master Brass olarak adlandırılan pirinç tel kullanılmıştır. Isıl işlemli 3 adet, ısıtma işlemli 3 adet D5 takım çeliği ve 3 adet alüminyum olmak üzere üç farklı malzeme, toplam (24×9) = 216 adet değişik kesme

şartlarında kesilmiş ve tüm kesme şartları için her malzeme aynı parametre şartlarında denenmiştir. Kesme işlemi sonunda numuneler, alkolle yıkanıp pamuğa sarılarak korozyon ve diğer etkenlere karşı koruma altına alınmıştır.

Gerçekleştirilen deneyler sonucunda değişken olarak seçilen parametrelerin etkilerinin tespiti için, her gruptaki malzemelerden değişken parametrelerle kesilen 6 değişik numune seçilmiş. $6 \times 3 = 18$ numune inceleme altına alınmıştır.

Farklı kesme alanlarına sahip numunelerin kesme parametrelerine göre işlem süreleri belirlenmiştir. Ayrıca deforme olan tellerin aşınma miktarını belirlemek amacıyla her kesme şartı için bir miktar tel numune alınmıştır.

Her bir numuneye uygulanan kesme parametreleri ve parametre değerleri Tablo 5.3' de verilmiştir.



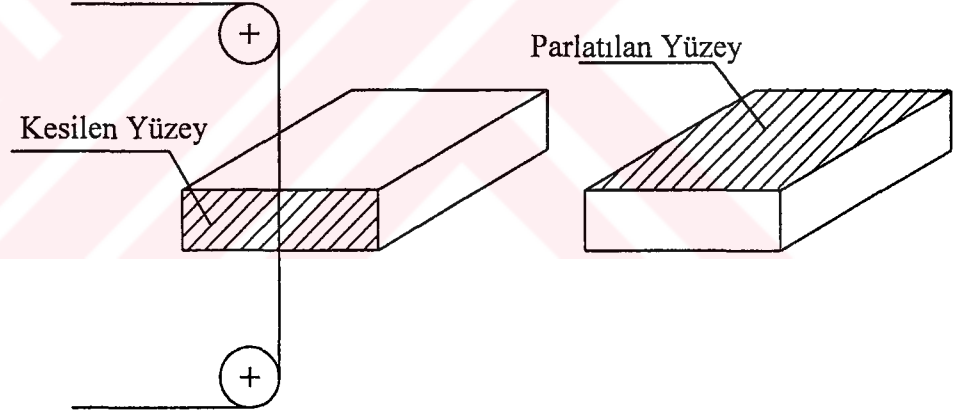
Tablo 5.3. Deneylerde Kullanılan Parametreler.

Deney No	On	Sıvı	WS	V	SV	MA	HP	IP	C	WT	SF	OFF
1	003	6	5	03	10	16	02	17	0	015	0008	16
2	003	12	5	03	10	16	02	17	0	015	0008	16
3	003	6	10	03	10	16	02	17	0	015	0008	16
4	003	12	10	03	10	16	02	17	0	015	0008	16
5	003	6	5	02	10	16	02	17	0	015	0008	16
6	003	12	5	02	10	16	02	17	0	015	0008	16
7	003	6	10	02	10	16	02	17	0	015	0008	16
8	003	12	10	02	10	16	02	17	0	015	0008	16
9	005	6	5	03	10	16	02	17	0	015	0008	16
10	005	12	5	03	10	16	02	17	0	015	0008	16
11	005	6	10	03	10	16	02	17	0	015	0008	16
12	005	12	10	03	10	16	02	17	0	015	0008	16
13	005	6	5	02	10	16	02	17	0	015	0008	16
14	005	12	5	02	10	16	02	17	0	015	0008	16
15	005	6	10	02	10	16	02	17	0	015	0008	16
16	005	12	10	02	10	16	02	17	0	015	0008	16
17	007	6	5	03	10	16	02	17	0	015	0008	16
18	007	12	5	03	10	16	02	17	0	015	0008	16
19	007	6	10	03	10	16	02	17	0	015	0008	16
20	007	12	10	03	10	16	02	17	0	015	0008	16
21	007	6	5	02	10	16	02	17	0	015	0008	16
22	007	12	5	02	10	16	02	17	0	015	0008	16
23	007	6	10	02	10	16	02	17	0	015	0008	16
24	007	12	10	02	10	16	02	17	0	015	0008	16

5.5. Metalografik İncelemeler

Deney numunelerinde, ısıdan etkilenen bölgeyi ve mikroyapıyı belirlemek için, kesme yüzeyine komşu bir yüzey bakalite alınarak, sırasıyla 200, 500, 800, 1000 ve 1200'lük su zımparalarından geçirilmiş ve daha sonra 6 ve 1µm elmas pastayla parlatılmıştır. D5 takım çeliği numuneleri % 2 Nital ile alüminyum numuneler ise Keller dağlayıcısı ile dağlanarak mikroskopta incelenmeye hazır hale getirilmiştir. Dağlama işlemi sonrası, numunelerin mikroyapıları hem optik hem de SEM mikroskoplarında incelenmiştir. Ayrıca, kesme yüzeyinin geometrisi optik ve SEM mikroskoplarıyla incelenmeye tabi tutulmuştur.

SEM mikroskop çalışmaları, Kayseri Erciyes Üniversitesi Araştırma ve Uygulama Merkezinde bulunan LEO 440 tip taramalı elektron mikroskobunda, optik mikroskop çalışmaları ise F.Ü. Makine Mühendisliği Bölümünde bulunan Olympus marka mikroskopta yapılmıştır.



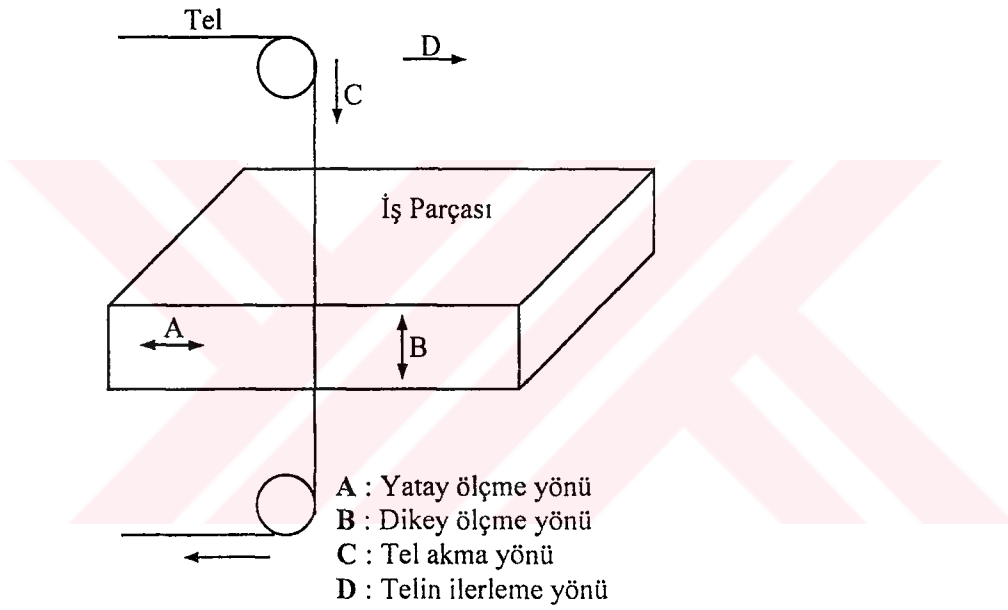
Şekil 5.4 Kesme Yüzeyine Göre Mikroyapı İnceleme Bölgesi.

5.6. Mikrosertlik Ölçümleri

Kesme işlemi sonrasında, numunelerde meydana gelen ısıdan etkilenen bölge derinliğinde sertlik değişimini belirlemek amacıyla, yüzeyden ve enine kesit boyunca mikrosertlik değerleri ölçülmüştür. Bunun için numuneler bakalit içerisine alınarak, yüzeyleri mikroskopta incelenebilecek kalitede parlatılmıştır. 10 (gf) yük kullanmak suretiyle, ölçümler Leica Q 500 / W cihazında yapılmıştır. Her bir numune üzerinde, yüzeyden itibaren 25 µm aralıklarla, ana matris sertliğine ulaşıncaya kadar sertlik ölçümü yapılmıştır.

5.7. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri

Yüzey pürüzlülük ölçümleri, Mitutoyo Surftest – 211 yüzey pürüzlülük cihazında ölçülmüştür. Şekil 5.5’ de görüldüğü gibi ölçümler, hem kesme yönünde hem de kesme yönüne dik yönlerde alınarak bu değerlerin ortalaması, ortalama yüzey pürüzlülüğü olarak kabul edilmiştir.



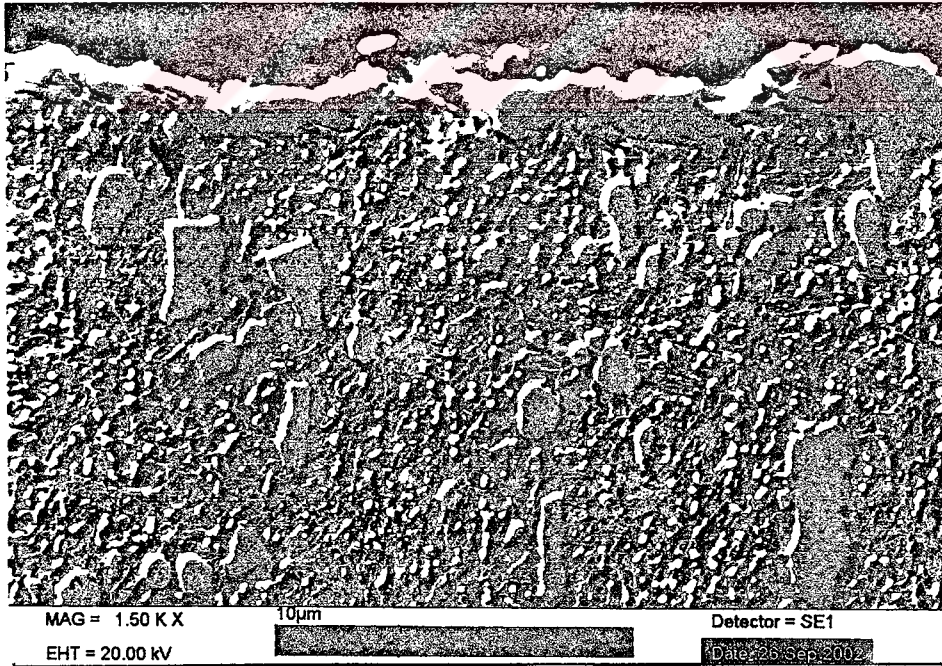
Şekil 5.5 Yüzey Pürüzlülüğü Ölçme Yönleri.

6. DENEY SONUÇLARI ve İRDELENMESİ

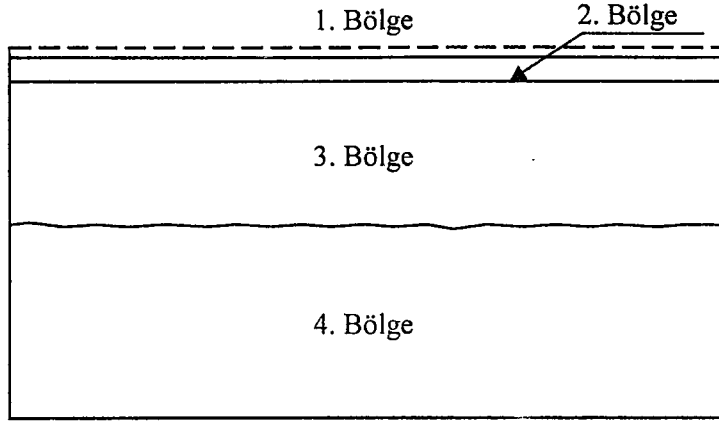
6.1. Metalografik İnceleme Sonuçları

D5 takım çeliği üzerinde yapılan mikroskop incelemeleri ve mikrosertlik ölçümleri birlikte dikkate alındığında, malzemede 4 farklı bölge görülmektedir. En dış yüzey (1. bölge), ergiyik metalin sıvı sirkülasyonu ile ara bölgeden uzaklaştırılmadan yüzeyde katılaşması neticesinde oluşan tabakadır. Bu tabaka, parlatma veya toz püskürtme ile kolaylıkla yüzeyden kaldırılabilir bir bölgedir. Bu tabakanın hemen altında (2. bölge), genellikle “Beyaz Tabaka” olarak adlandırılan çok yüksek sıcaklıklara maruz kalan ve ergiyik durumdan hızlı şekilde soğuyup katılaşan tabaka bulunmaktadır. Bu tabaka temperlenmemiş martenzittir. Bu yöntemde, hızlı ısınma ve soğuma süreci, ısıl gerilme çatlaklarına çok hassas olan gevrek bir yüzey tabakasının oluşumuna neden olmaktadır. “Beyaz Tabaka”, optik mikroskop altında beyaz görülmesinden ve standart dağlayıcılara dirençli olmasından dolayı “Beyaz Tabaka” olarak adlandırılmaktadır.

“Beyaz Tabaka” altında (3. bölge), nispeten daha yavaş ısınma ve soğuma sonucunda tavlanmış veya temperlenmiş bir tabaka görülmektedir. Son olarak ana malzeme (4. bölge) gelmektedir. Şekil 6.1’de mikroyapı dağılımını gösteren SEM mikroyapı fotoğrafı verilmiştir. Bu tabakaların şematik modellenmesi ise Şekil 6.2’de görülmektedir.

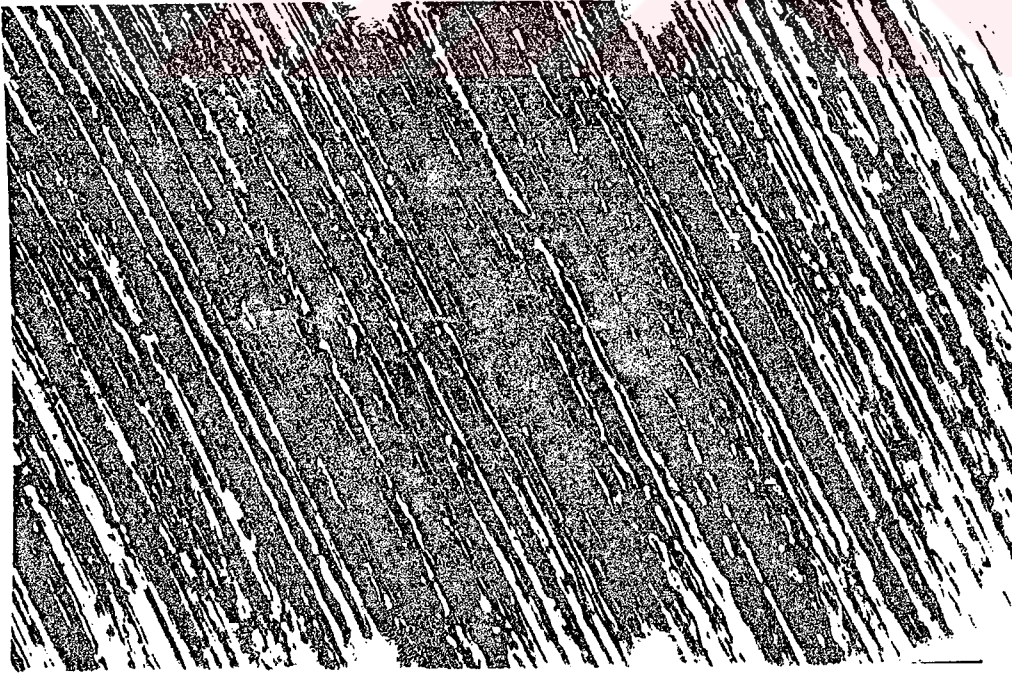


Şekil 6.1 Isıl İşlemsiz D5 Çeliğinin SEM Mikroyapı Fotoğrafı.

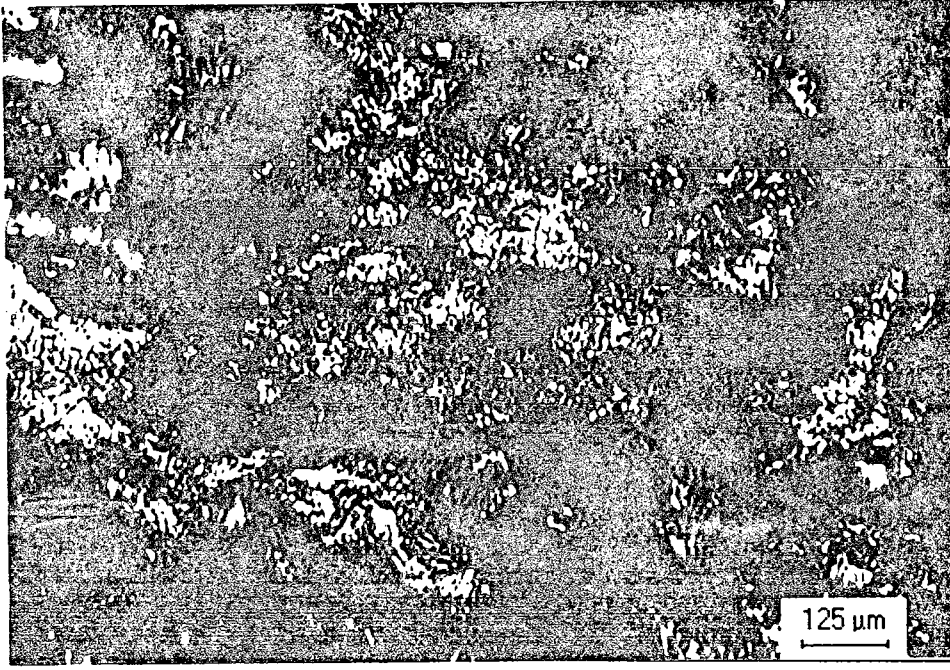


Şekil 6.2 Kesme Sonrasında Oluşan Tabakaların Şematik Görünüşü.

Kesme işlemi sonrasında, alüminyum numuneler üzerinde yapılan metalografik incelemeler ve mikrosertlik ölçümlerinde ise, çeliğe göre farklı bir mikroyapı dağılımı görülmektedir. En dış tabaka, ısıtılma işlemi neticesinde sertleşmiş bölge ve bu bölgeden itibaren tedrici olarak sertlik azalmasının görüldüğü, nispeten daha az ısı etkisinde kalan bölge gelmektedir. Kesme işlemi sonrasında, yüzey geometrisi incelendiğinde yüzeyin, kalıntı ve hemen hemen aynı boyutlara sahip kraterlerden oluştuğu görülmektedir. Bu yüzey geometrisi klasik işleme tezgahlarında olduğu gibi çizik şeklinde değildir. (Şekil 6.3 ve 6.4)



Şekil 6.3 D5 Takım Çeliğinin Frezede Elde Edilen Yüzey Geometrisi.



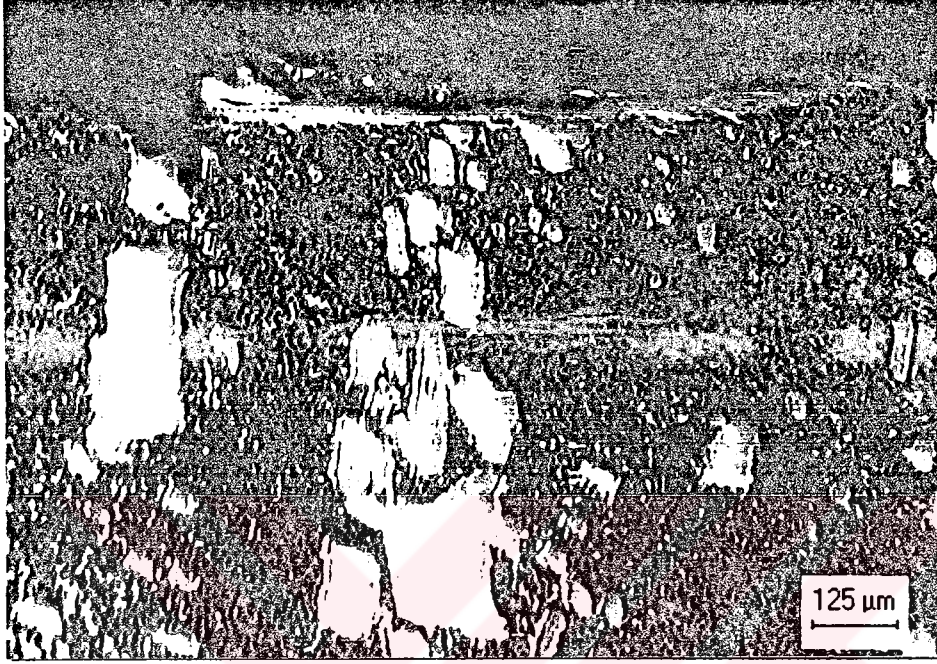
Şekil 6.4 D5 Takım Çeliğinin Tel Erozyonda Elde Edilen Yüzey Geometrisi.

Bilindiği gibi, yüzey pürüzlülüğü makine elemanlarında özellikle de birbiri üzerinde sürtünerek çalışan makine elemanlarında erken aşınmalara neden olmaktadır. Böyle bir durum, makine elemanın hassasiyetinin veya çalışma verimliliğinin düşmesine neden olur. Yüzey geometrisi mikroskop incelemeleri ve yüzey pürüzlülük ölçümleriyle birlikte düşünüldüğünde, yüzey pürüzlülüğünün diğer imalat yöntemlerine göre oldukça düşük olduğu söylenebilir. Buna bağlı olarak tel erozyonla kesilmiş yüzeylerde meydana gelen kraterler, birer yağ odacığı olarak, birlikte çalıştığı makine elemanı ile, kendi arasında bir yağ filmi oluşturup sürekli bir yağlama sağlayacağı için aşınmanın bir ölçüde azalacağı söylenebilir.

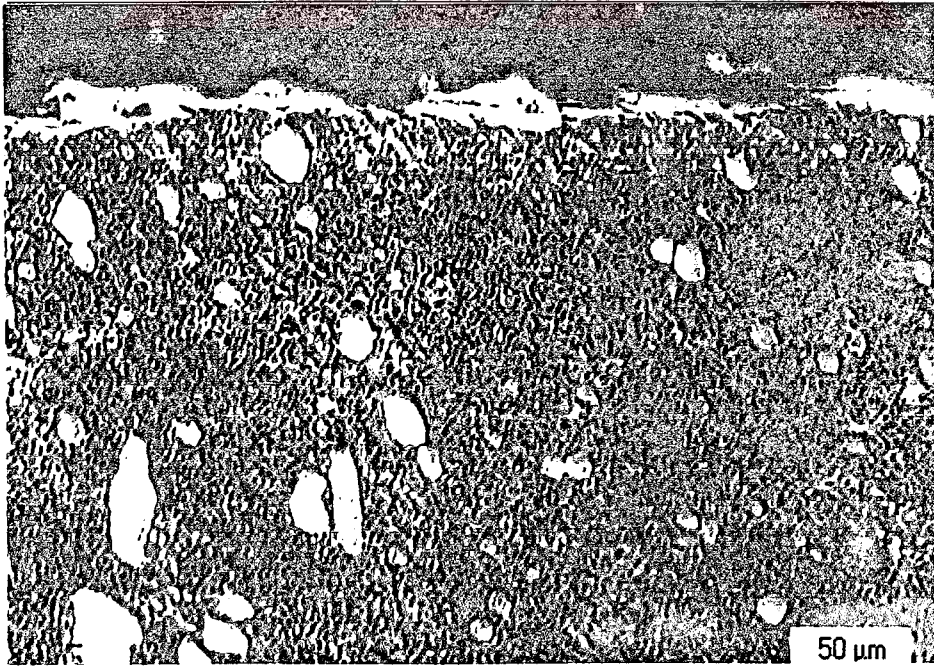
Farklı gerilim (V) ve Puls süreleri (ON) parametrelerinde kesilen ısıl işlemsiz D5 takım çeliğine ait optik mikroskop görüntüleri Şekil 6.5, 6.6 ve 6.7’de görülmektedir. Deneylerde kullanılan D5 takım çeliğinin yüksek karbonlu ve yüksek kromlu olmasından dolayı, şekillerde görüldüğü gibi, yapı martenzit yapı içerisinde karbürlerden oluşmaktadır. En yüksek Beyaz Tabaka kalınlığı, 7 ns Puls süresi ve 270 volt gerilim şartları altında takriben 50 μm olarak tespit edilmiştir. Azalan Puls süresi ve gerilim şartlarında bu tabakanın kalınlığı azalmaktadır.

Daha önce açıklandığı gibi, Puls süresinin tele uygulanan elektrik zamanının uzunluğu ve ana güç voltajı olarak adlandırılan gerilim parametresinin ise uygulanan bu enerjinin şiddeti olduğu dikkate alındığında, bu iki parametrenin sayısal değerlerinin artırılmalarıyla malzemelerin yüzeylerinde meydana gelen enerji yoğunluğu ve süresinin bu sonuçlarda etkili olduğu söylenebilir.

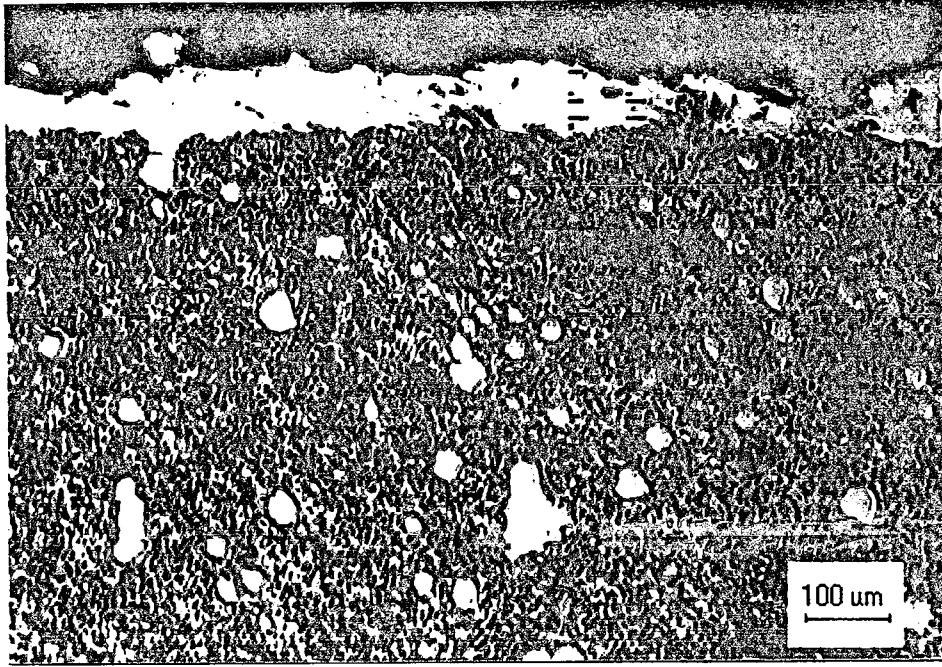
Tel ilerleme hızı ve sıvı sirkülasyon basıncının uygulanan deney şartları içerisinde ısıdan etkilenen bölge üzerinde metalografik açıdan belirgin ölçüde etkili olmadığı tespit edilmiştir.



Şekil 6.5 Düşük On ve V parametrelerinde kesilen ısıtılmış D5'in Mikroyapı fotoğrafı. (On =3 ns ve V=100 volt)

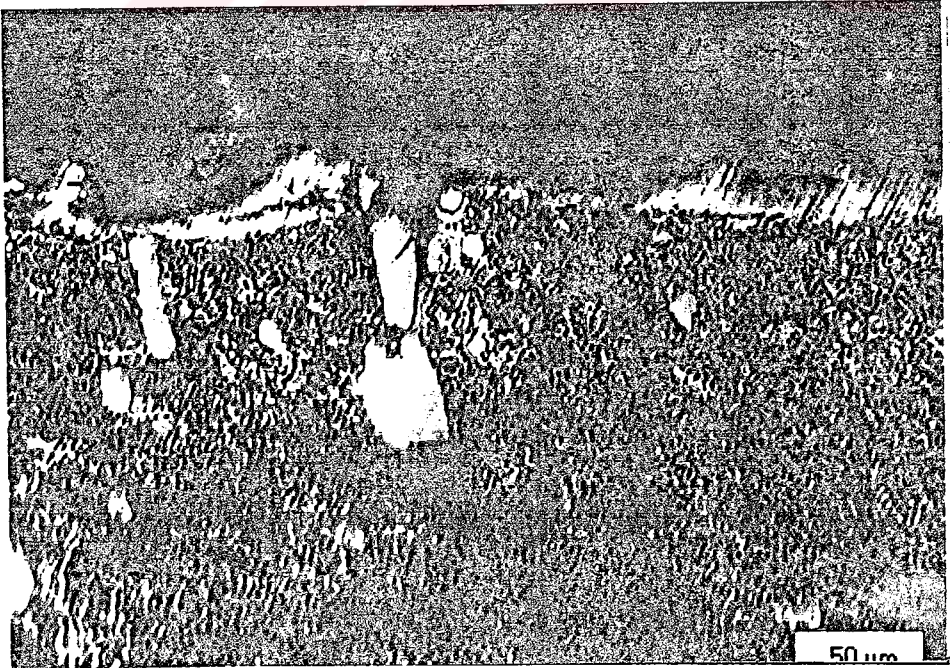


Şekil 6.6 Isıtılmış D5 takım çeliğine ait Mikroyapı fotoğrafı. (On =5 ns ve V=100 volt)



Şekil 6.7 Isıl işlemsiz D5 çeliğine ait Mikroyapı fotoğrafı. (On =7 ns ve V=270 volt)

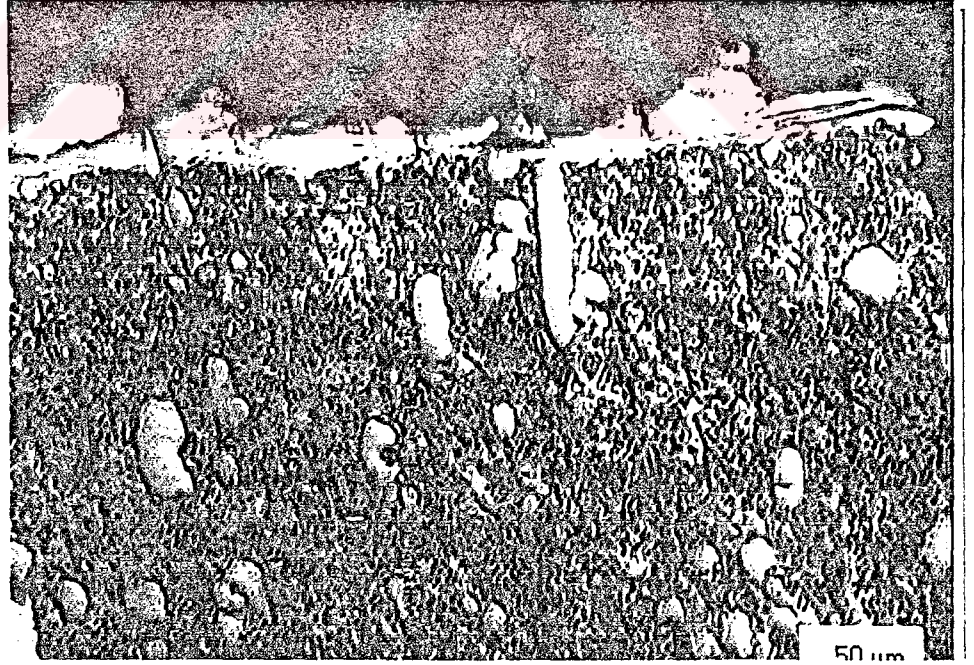
Farklı gerilim (V) ve Puls süreleri (ON) parametrelerinde kesilen ısıtılmış D5 takım çeliğine ait optik mikroskop görüntüleri Şekil 6.8, 6.9 ve 6.10'da görülmektedir. Şekillerde görüldüğü gibi, sertleştirme işlemi sonunda mikroyapı yüksek derecede temperlenmiş martenzit matris ve içerisinde homojen dağılım gösteren karbürlerden oluşmaktadır. En yüksek Beyaz Tabaka kalınlığı, 7 ns Puls süresi ve 270 volt gerilim şartları altında takriben 30 µm olarak tespit edilmiştir. Azalan Puls süresi ve gerilim şartlarında bu tabakanın kalınlığı azalmaktadır.



Şekil 6.8 D5 Takım Çeliğinin Optik Mikroskop Görüntüsü.



Şekil 6.9 D5 Takım Çeliğinin Optik Mikroskop Görüntüsü.



Şekil 6.10 D5 Takım Çeliğinin Optik Mikroskop Görüntüsü.

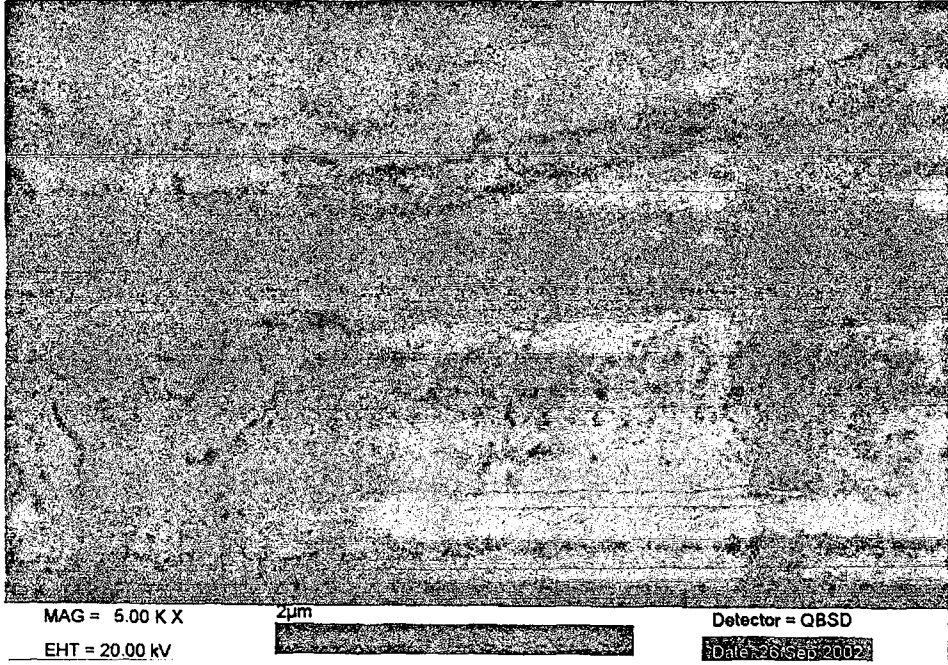
Isıl işlemsiz ve ısıt işlemlı D5 takım çeliklerine ait bütün numunelerde uygulanan parametrelere bağılı olarak mikro çatlaklar görölmektedir. Isıl işlemlı D5 takım çeliklerinde,

malzeme içerisinde karbür yoğunluğuna bağlı olarak, bu mikro çatlakların yoğunluğu ve nufuziyeti artmaktadır. Bu çatlaklar, yüzeyden ana matrise doğru olabildiği gibi (Şekil 6.11), Beyaz Tabaka altında da görülebilmektedir (Şekil 6.12 ve Şekil 6.13).

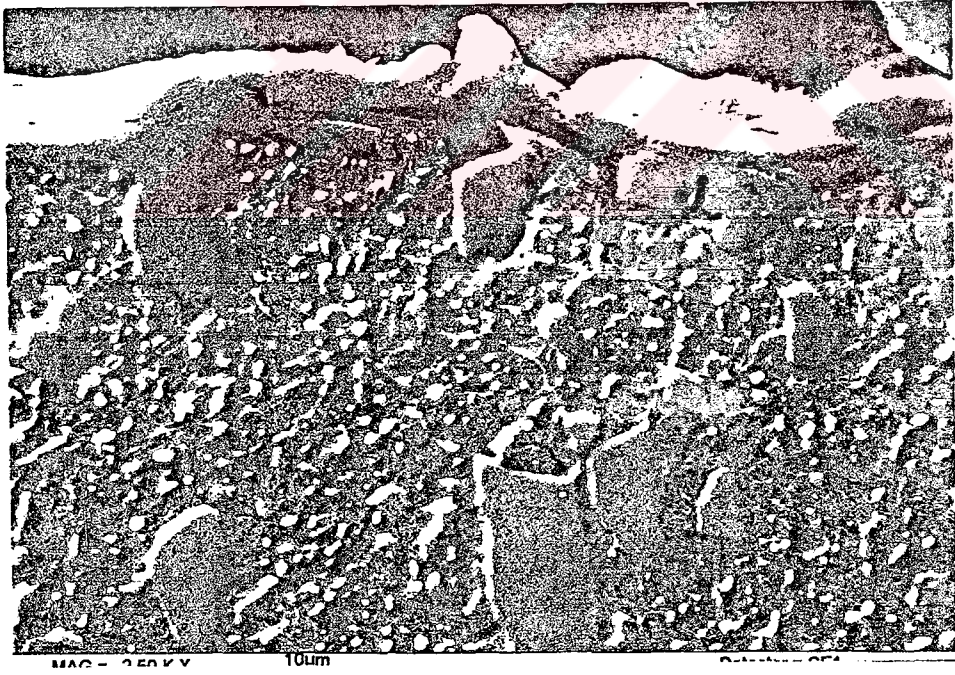
Bu çatlaklar, plastik deformasyondan kaynaklandığı gibi ayrıca malzemenin maksimum çekme mukavemetini aşan çok yüksek ısı gerilmelerinin oluşumundan kaynaklanmaktadır. Bu çatlakların boyut ve yoğunluklarının, Şekil 6.14’de görüldüğü gibi Puls süresi (ON) ve gerilim (V) parametrelerine bağlı olarak arttığı, buna karşın dielektrik sıvı sirkülasyon basıncı ve tel ilerleme hızlarının uygulanan deney şartları için, çatlak oluşumunda etkili olmadığı görülmüştür. Bu çatlakların hasar için başlangıç noktaları gibi davranması muhtemeldir (Griffiths, 1987, Chou and Evans, 1997). Özellikle dinamik yüklemeler altında çalışan makine elemanlarında yorulma dayanımını düşüreceği söylenebilir.



Şekil 6.11 Yüzeyden ana matrise doğru mikro çatlak yapısı.



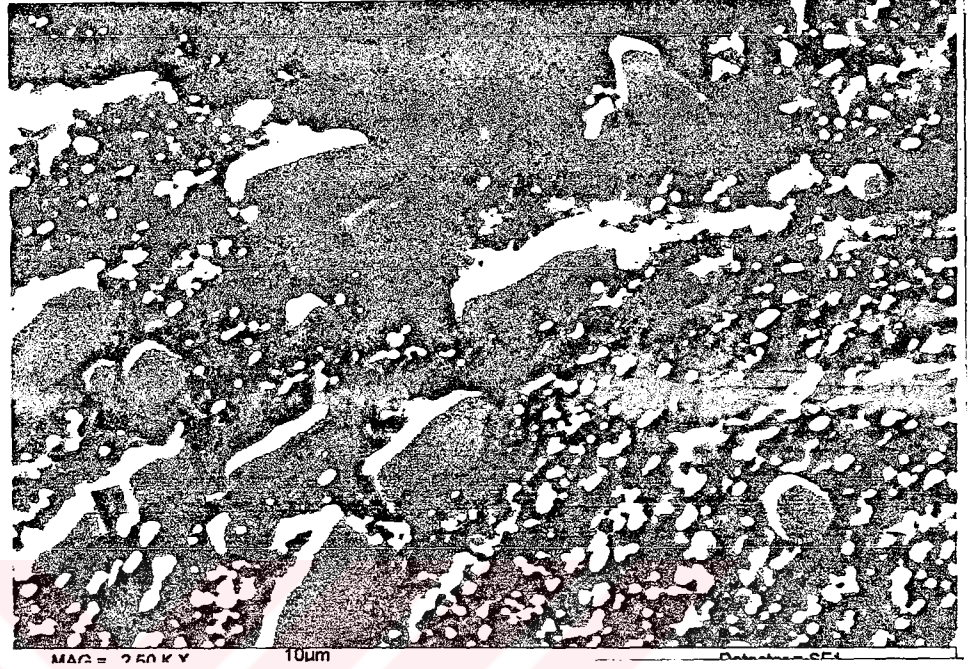
Şekil 6.12 Beyaz Tabaka altında mikro çatlak görüntüsü.



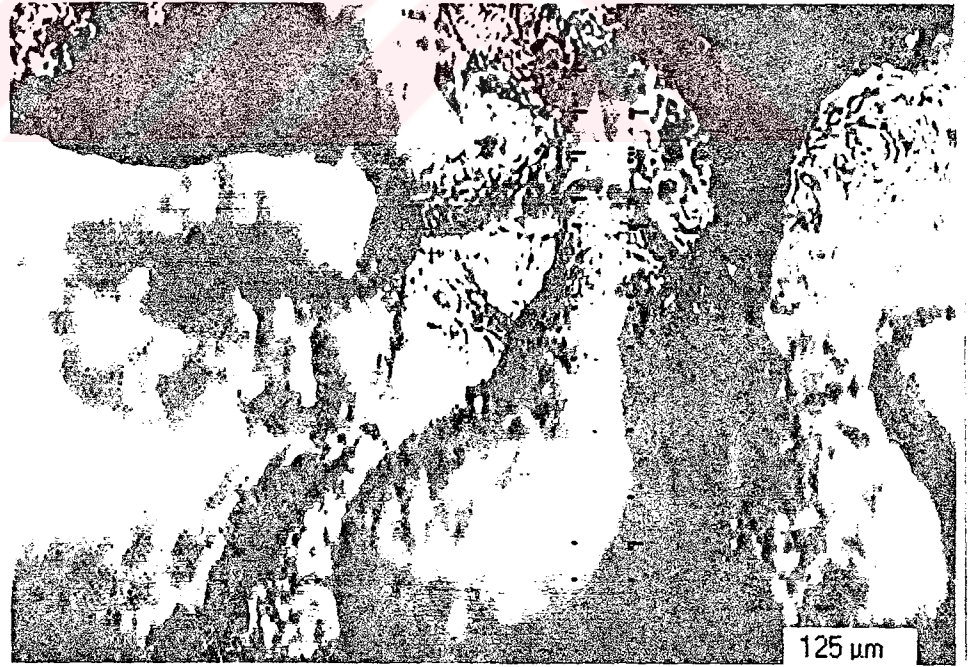
Şekil 6.13 Beyaz Tabaka altında mikro çatlak görüntüsü.

Kesme işlemi sonrasında, alüminyum numunelerin kesme yüzeylerinden alınan optik mikro yapı fotoğrafları, Şekil 6.15 ve 6.16'da verilmiştir. Şekillerde görüldüğü gibi, yüzey birbiri içerisine geçmiş kraterlerden oluşmaktadır. Bu kraterlerin boyutları D5 takım çeliği numunelerine nazaran daha büyüktür. Bunun nedeni, alüminyumun ergime sıcaklığının düşük ve ısı iletkenlik düzeyinin yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Yine bu kraterlerin, çelik

numunelerde olduğu gibi artan Puls süresi ve gerilim parametrelerine paralel olarak arttığı görülmektedir.



Şekil 6.14 İşlem Parametrelerinin Artmasıyla Çatlak Yoğunluğu Dağılımı.



Şekil 6.15 Alüminyum Numunelerin Kesme Yüzeylerinden Alınan Optik Mikroskop Fotoğrafi.

Alüminyum malzemelerin optik, SEM mikroskop ve mikrosertlik incelemeleri birlikte değerlendirildiğinde Puls süresi ve gerilim

parametrelerinin artırılmalarıyla ısıdan etkilenen bölge uzunlukları da arttığı, ancak bu uzunluğun alüminyumun ısı iletim katsayısının yüksek olmasından dolayı numunelerin erken soğumasına bağılı olarak D5 takım çeliğinden daha küçük olduğu tespit edilmiştir (Şekil 6.17, Şekil 6.18).

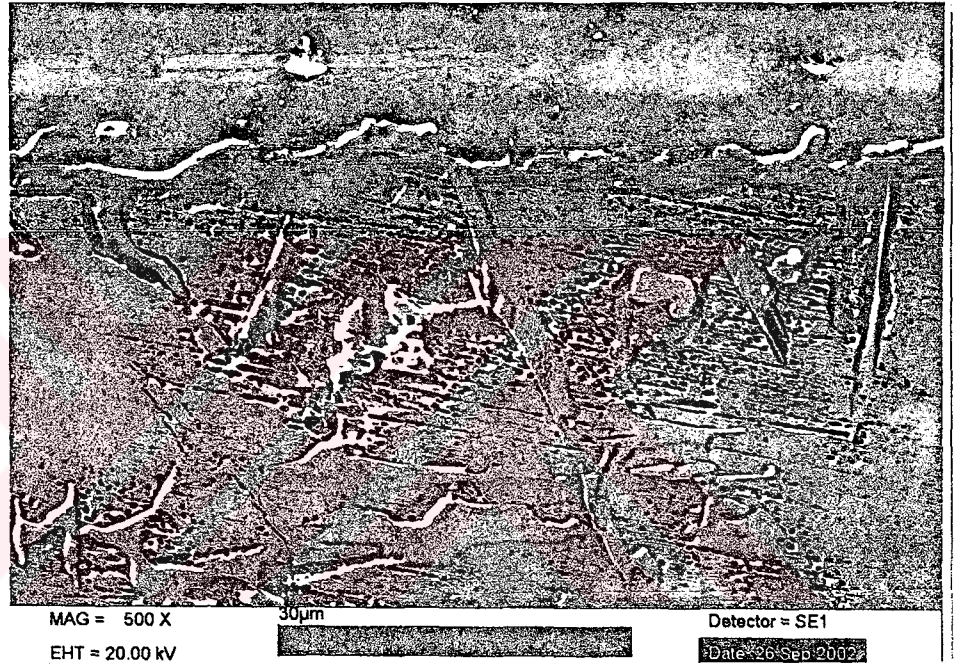


Şekil 6.16 Alüminyum Numunelerin Kesme Yüzeylerinden Alınan Optik Mikroskop Fotoğrafları.

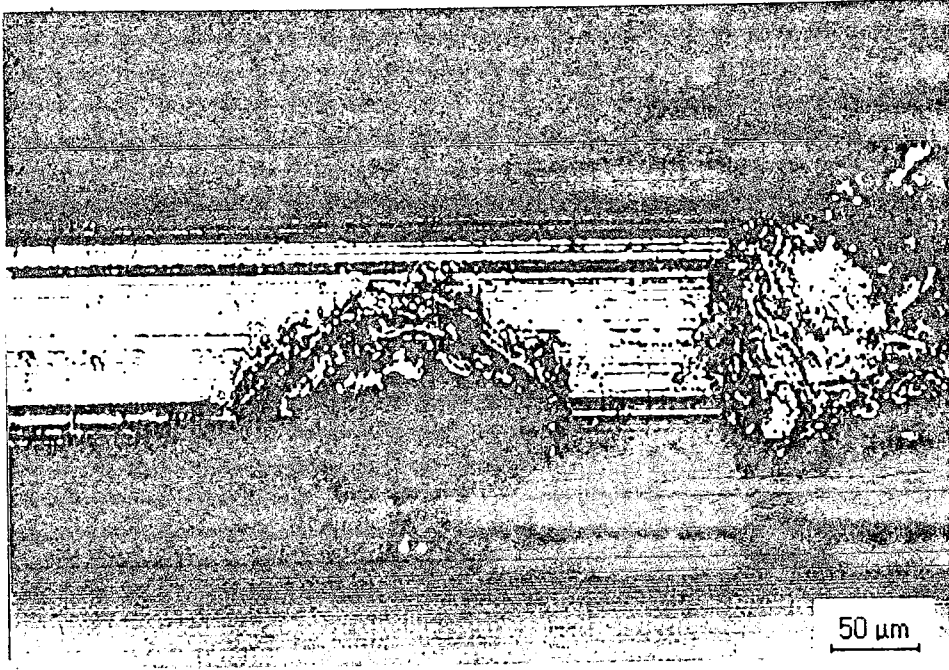


Şekil 6.17 Alüminyumun Optik Mikroyapı Fotoğrafları.

Tel erozyon yönteminde, iş parçası yüzeyinde aşınma gerçekleştiği gibi tel elektrot yüzeyinde de aşınmalar meydana gelmektedir. Artan Puls süresi, ve gerilim parametrelerine bağlı olarak telde meydana gelen aşınma daha fazla görülürken, sıvı sirkülasyon basıncının artırılması nispeten krater yoğunluğunu azaltmaktadır. Tel ilerleme hızının artırılması durumunda, telde meydana gelen kraterler tel yüzeyine yayılmaktadır. Dolayısıyla aynı noktada kıvılcım sayısının azalması, özellikle yüksek yüksek voltaj ve ON sürelerinde görülen tel kırılmalarını önlemektedir. Şekil 6.19 ve Şekil 6.20’de düşük ve yüksek tel ilerleme hızlarında tel yüzeyinde meydana gelen kraterler görülmektedir.



Şekil 6.18 Alüminyumun SEM mikroyapı fotoğrafı.



Şekil 6.19 Tel İlerleme Hızı $W_s=10$ m/ dak Durumunda Teldeki Krater Görüntüsü.



Şekil 6.20 Tel İlerleme Hızı $W_s=5$ m/ dak Durumunda Teldeki Krater Görüntüsü.

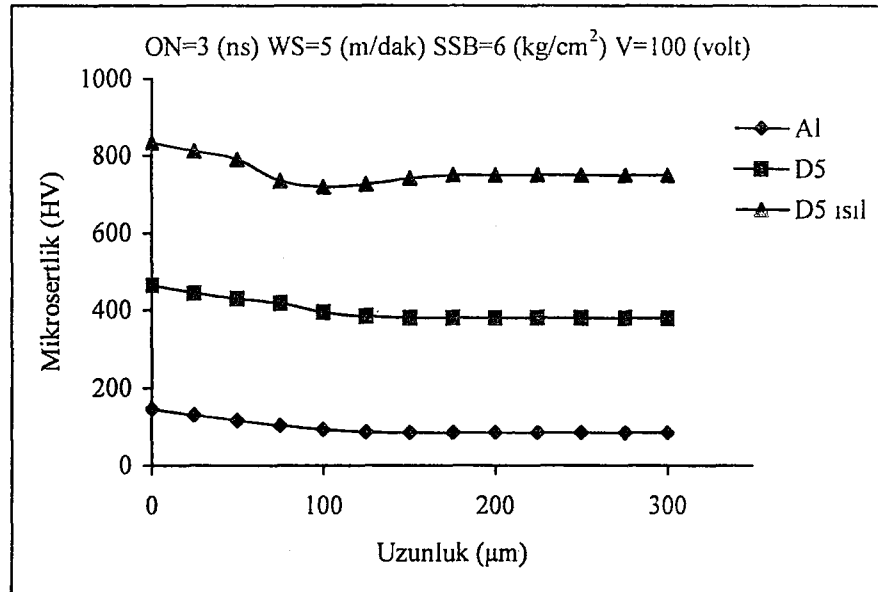
6.2. Mikrosertlik Ölçüm Sonuçları

6.2.1. Puls Süresinin Etkisi

Sabit tel ilerleme hızı (5 m/dak), sıvı sirkülasyon basıncı (6 kg/cm²), gerilim (100 volt) ve alan (40 mm²) parametreleri altında puls süresinin değişimi ile gerçekleştirilen kesme işlemleri neticesinde, malzemelerdeki sertlik değişim değerleri Tablo 6.1, 6.2 ve 6.3’de verilmiştir. Bu tablolardaki değerlere ait grafikler ise, Şekil 6.21, 6.22 ve 6.23’de görülmektedir.

Tablo 6.1. Deney parametrelerine bağlı olarak mikrosertlik değerleri.

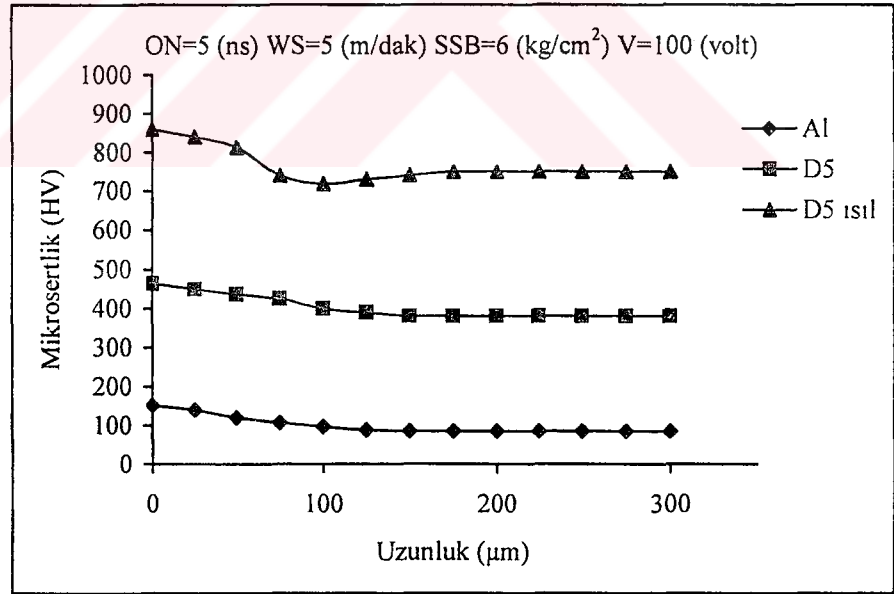
Deney Parametreleri ve Değerleri			
Puls süresi (ns)	Dielektrik sıvı basıncı (kg/cm ²)	Tel ilerleme hızı (m/dak)	Voltaj (volt)
3	6	5	100
Uzunluk (μm)	Malzeme cinsi ve mikrosertlik değerleri (HV)		
	Alüminyum	D5	D5 ısıtılmış
0	145	465	835
25	130	445	812
50	118	430	791
75	104	419	736
100	93	395	721
125	87	386	727
150	85	380	742
175	85	380	750
200	85	380	750
225	85	380	750
250	85	380	750
275	85	380	750
300	85	380	750



Şekil 6.21 Puls süresinin mikrosertliğe etkisi.

Tablo 6.2. Deney parametrelerine bağı olarak mikrosertlik değerleri.

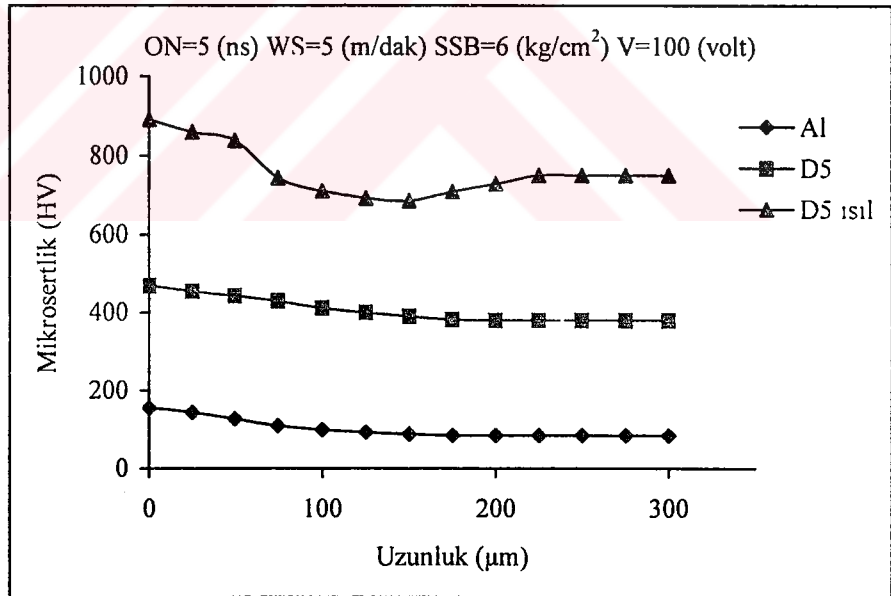
Deney Parametreleri ve Değerleri			
Puls süresi (ns)	Dielektrik sıvı basıncı (kg/cm ²)	Tel ilerleme hızı (m/dak)	Voltaj (volt)
5	6	5	100
Uzunluk (μm)	Malzeme cinsi ve mikrosertlik değerleri (HV)		
	Alüminyum	D5	D5 ısıtılmış
0	152	465	860
25	140	450	840
50	120	436	813
75	106	425	740
100	96	400	718
125	89	389	730
150	85	380	740
175	85	380	750
200	85	380	750
225	85	380	750
250	85	380	750
275	85	380	750
300	85	380	750



Şekil 6.22 Puls süresinin mikrosertliğe etkisi.

Tablo 6.3. Deney parametrelerine bağı olarak mikrosertlik değerleri.

Deney Parametreleri ve Değerleri			
Puls süresi (ns)	Dielektrik sıvı basıncı (kg/cm ²)	Tel ilerleme hızı (m/dak)	Voltaj (volt)
7	6	5	100
Uzunluk (μm)	Malzeme cinsis ve mikrosertlik değerleri (HV)		
	Alüminyum	D5	D5 ısıtılmış
0	155	470	890
25	144	456	860
50	128	443	837
75	110	430	744
100	100	413	711
125	93	400	692
150	87	390	686
175	85	382	709
200	85	380	728
225	85	380	750
250	85	380	750
275	85	380	750
300	85	380	750



Şekil 6.23 Puls süresinin mikrosertliğe etkisi.

Grafikler incelendiğinde, kesme işlemi sonrasında numunelerin yüzey sertliklerinin önemli ölçüde arttığı görülmektedir. Alüminyum numunelerde ise bu artış nispeten düşüktür. Ayrıca, artan puls sürelerine paralel olarak malzemelerin yüzey sertliklerinde de nispeten belirli

bir artışın olduğu görülmektedir. Alüminyum ve D5 takım çelikleri numunelerinde telin geçtiği yüzeyden malzeme ana yapısına doğru oransal olarak tedrici bir sertlik azalması olurken, ısıtılmış D5 numunelerde diğer numunelerden farklı olarak, “White Layer” tabakası ile ana matris arasında ısıdan etkilenmiş bir ara tabaka göze çarpmaktadır. Bu tabaka aşırı temperlenmiş veya tavlanmış bölge olarak nitelendirilebilir. Dolayısıyla ısıdan etkilenmiş bu bölge içerisindeki sertlik değerleri, nispeten ana matris sertliğinden daha yumuşak bir yapıdır.

Puls süresinin artmasıyla, D5 takım çeliği numunelerinde ısıdan etkilenmiş bölgenin genişliği daha fazla görülürken, alüminyum numunelerde, bu malzemenin ısı iletim katsayısının yüksek olması nedeniyle daha düşük olduğu görülmektedir. D5 takım çeliklerinde, düşük puls süresinde bu aralık takriben 150 μm iken, yüksek puls süresinde bu aralık 200 μm 'a kadar ulaşmaktadır. Alüminyum numunelerde ise bu değer takriben 80- 120 μm arasında değişmektedir. Bu sonuçlarda, daha önce ifade edildiği gibi puls süresinin kıvılcım boşalım süresini artırmasının ve malzemelerin ısınma ve soğuma sürecindeki fiziksel özellikleriyle ilgili olduğu söylenebilir.

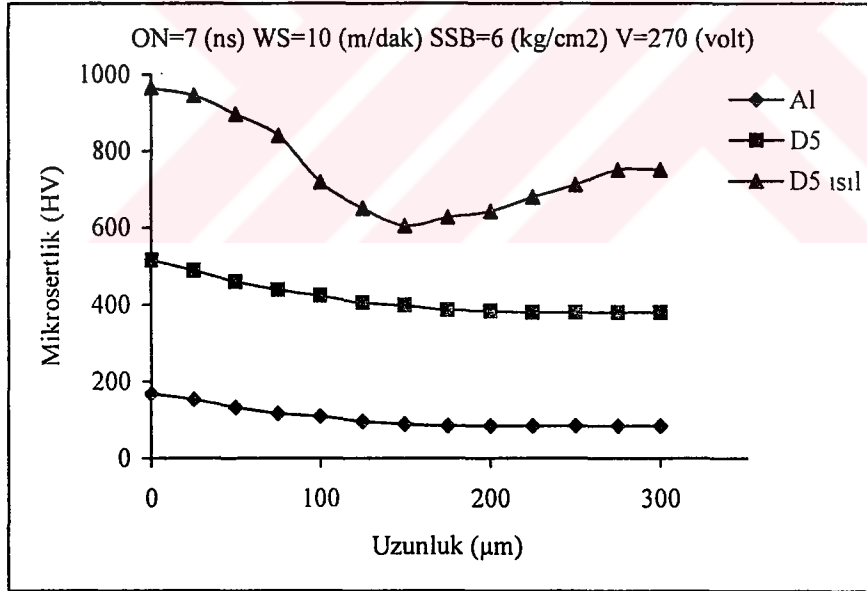
6.2.2. Dielektrik Sıvı Sirkülasyon Basıncının Etkisi

Sabit tel ilerleme hızı (5 m/dak), puls süresi (7ns), gerilim (270 volt) ve alan (40 mm²) parametreleri altında sıvı sirkülasyon basıncının değişimi ile gerçekleştirilen kesme işlemleri neticesinde, malzemelerdeki sertlik değişim değerleri Tablo 6.4 ve 6.5’de verilmiştir. Bu tablolardaki değerlere ait grafikler ise, Şekil 6.24 ve 6.25’de görülmektedir.

Grafikler incelendiğinde, artan sıvı sirkülasyon basıncı ile tüm numunelerin yüzey sertliklerinde belirgin olmamakla beraber nispeten bir sertlik artışının olduğu görülmektedir. Yine, uygulanan deney şartları içerisinde ısıdan etkilenen bölge aralığında önemli ölçüde bir değişimin olmadığı görülmektedir. Dolayısıyla seçilen düşük (6 kg/cm²) dielektrik sıvı basıncının yeterli ölçüde soğutma işlemini gerçekleştirdiği söylenebilir.

Tablo 6.4. Deney parametrelerine bağı olarak mikrosertlik değerleri.

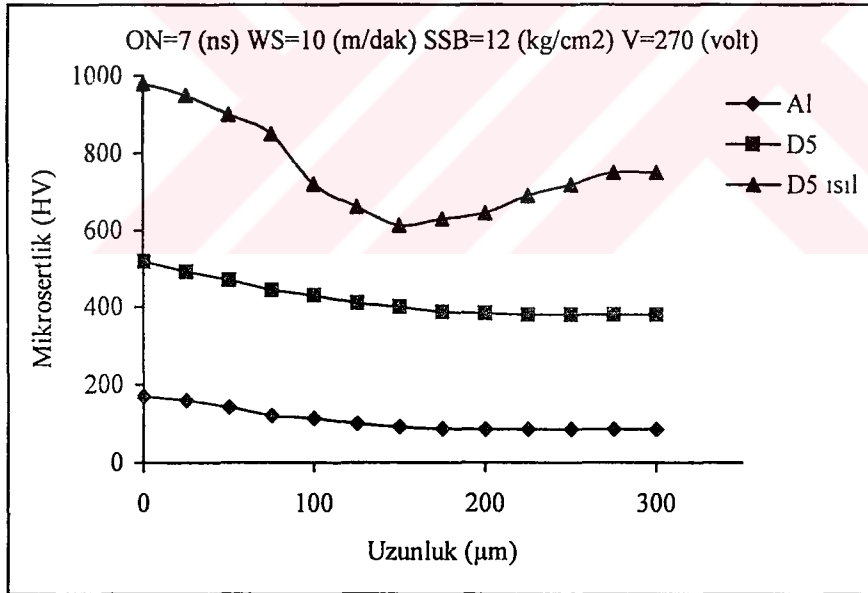
Deney Parametreleri ve Değerleri			
Puls süresi (ns)	Dielektrik sıvı basıncı (kg/cm ²)	Tel ilerleme hızı (m/dak)	Voltaj (volt)
7	6	10	270
Uzunluk (μm)	Malzeme cinsi ve mikrosertlik değerleri (HV)		
	Alüminyum	D5	D5 ısıtılmış
0	169	516	965
25	154	489	944
50	133	461	895
75	117	439	840
100	110	424	719
125	96	405	651
150	89	398	606
175	85	387	627
200	85	383	642
225	85	380	680
250	85	380	711
275	85	380	750
300	85	380	750



Şekil 6.24 Sıvı sirkülasyon basıncının mikrosertliğe etkisi.

Tablo 6.5. Deney parametrelerine bağlı olarak mikrosertlik değerleri.

Deney Parametreleri ve Değerleri			
Puls süresi (ns)	Dielektrik sıvı basıncı (kg/cm ²)	Tel ilerleme hızı (m/dak)	Voltaj (volt)
7	12	10	270
Uzunluk (μm)	Malzeme cinsi ve mikrosertlik değerleri (HV)		
	Alüminyum	D5	D5 ısıtılmış
0	170	520	980
25	160	493	950
50	142	470	900
75	120	444	850
100	114	430	720
125	100	410	661
150	92	400	613
175	86	388	630
200	85	384	645
225	85	380	690
250	85	380	718
275	85	380	750
300	85	380	750



Şekil 6.25 Sıvı sirkülasyon basıncının mikrosertliğe etkisi.

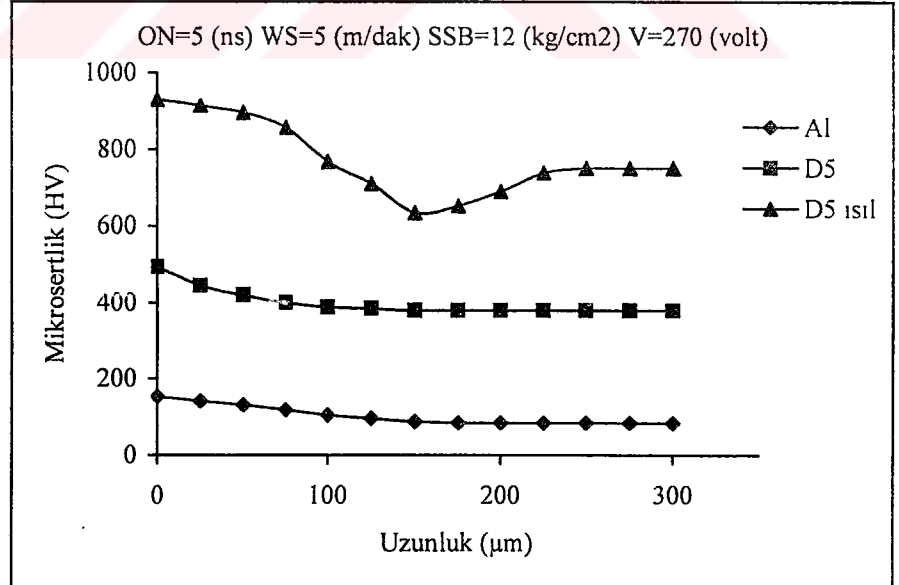
6.2.3. Tel İlerleme Hızının Etkisi

Sabit sıvı sirkülasyon basıncı (12 kg/cm²), puls süresi (5ns), gerilim (270 volt) ve alan (40 mm²) parametreleri altında tel ilerleme hızının değişimi ile gerçekleştirilen kesme işlemleri neticesinde, malzemelerdeki sertlik değişim değerleri Tablo 6.6 ve 6.7’de verilmiştir. Bu tablolardaki değerlere ait grafikler ise, Şekil 6.26 ve 6.27’de görülmektedir.

Tel ilerleme hızlarının sertlik değişimi üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığı tespit edilmiştir. Değer farklarının ise ölçüm duyarlılığından kaynaklandığı sonucuna varılmıştır.

Tablo 6.6. Deney parametrelerine bağlı olarak mikrosertlik değerleri.

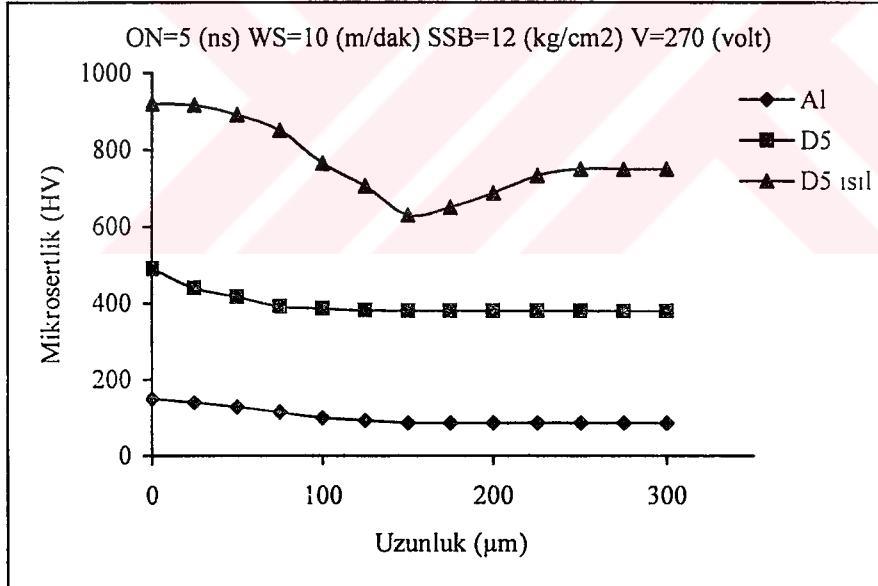
Deney Parametreleri ve Değerleri			
Puls süresi (ns)	Dielektrik sıvı basıncı (kg/cm ²)	Tel ilerleme hızı (m/dak)	Voltaj (volt)
5	12	5	270
Uzunluk (μm)	Malzeme cinsi ve mikrosertlik değerleri (HV)		
	Alüminyum	D5	D5 ısıtılmış
0	154	494	930
25	142	445	914
50	131	420	895
75	118	399	856
100	104	388	767
125	96	384	710
150	87	380	634
175	85	380	653
200	85	380	690
225	85	380	738
250	85	380	750
275	85	380	750
300	85	380	750



Şekil 6.26 Tel ilerleme hızının mikrosertliğe etkisi.

Tablo 6.7. Deney parametrelerine bağılı olarak mikrosertlik değerleri.

Deney Parametreleri ve Değerleri			
Puls süresi (ns)	Dielektrik sıvı basıncı (kg/cm ²)	Tel ilerleme hızı (m/dak)	Voltaj (volt)
5	12	10	270
Uzunluk (μm)	Malzeme cinsi ve mikrosertlik değerleri (HV)		
	Alüminyum	D5	D5 ısıtılmış
0	150	490	920
25	140	440	916
50	128	416	890
75	114	392	850
100	100	386	765
125	92	381	706
150	85	380	630
175	85	380	650
200	85	380	688
225	85	380	733
250	85	380	750
275	85	380	750
300	85	380	750



Şekil 6.27 Tel ilerleme hızının mikrosertliğe etkisi.

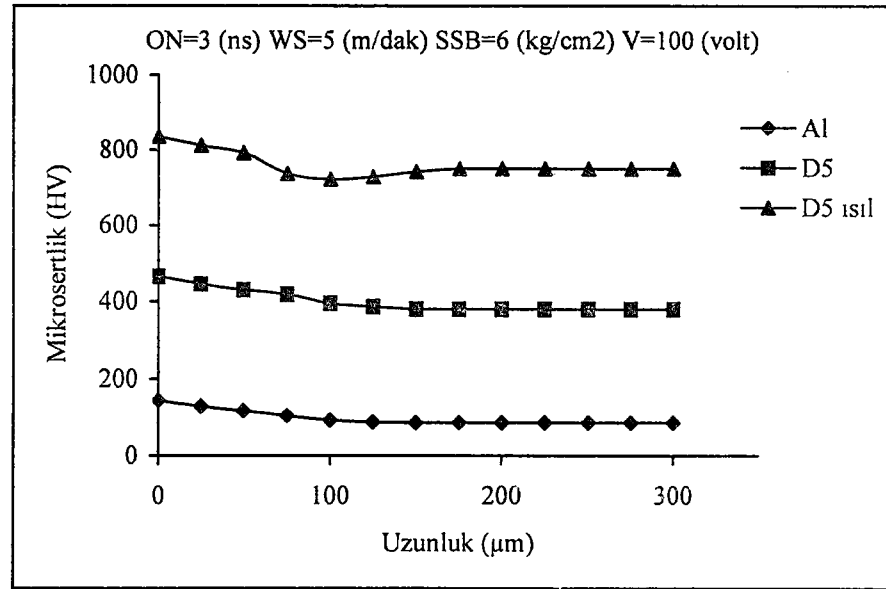
6.2.4. Ana Güç Voltajının Etkisi

Sabit sıvı sirkülasyon basıncı (12 kg/cm^2), puls süresi (3ns), tel ilerleme hızı (5 m/dak) ve alan (40 mm^2) parametreleri altında gerilimin değişimi ile gerçekleştirilen kesme işlemleri neticesinde, malzemelerdeki sertlik değişim değerleri Tablo 6.8 ve 6.9’de verilmiştir. Bu tablolardaki değerlere ait grafikler ise, Şekil 6.28 ve 6.29’da görülmektedir.

Grafikler incelendiğinde, gerilimin artırılmasına bağlı olarak yüzey sertliğinin ve ısıdan etkilenen bölge aralığının arttığı görülmektedir. D5 ısıtma işlemli numunelerde, gerilim artışına paralel olarak aşırı temperlenmiş yapının daha belirgin olarak oluştuğu ve bu bölgedeki sertliğin ana matris sertliğinin altına kadar düştüğü görülmektedir. Bilindiği gibi, artan gerilim değeri, yüzeyde ve dolayısıyla yüzey altındaki sıcaklık dağılımını artırmaktadır. Yüksek sıcaklıktan dolayı, yüzeyde ani soğuma neticesinde yüzey sertliği artmaktadır. Yüzey altındaki tabakalarda ise, yavaş soğumanın etkisiyle yapının aşırı temperlenmesine neden olduğu sonucuna varılmıştır.

Tablo 6.8. Deney parametrelerine bağlı olarak mikrosertlik değerleri

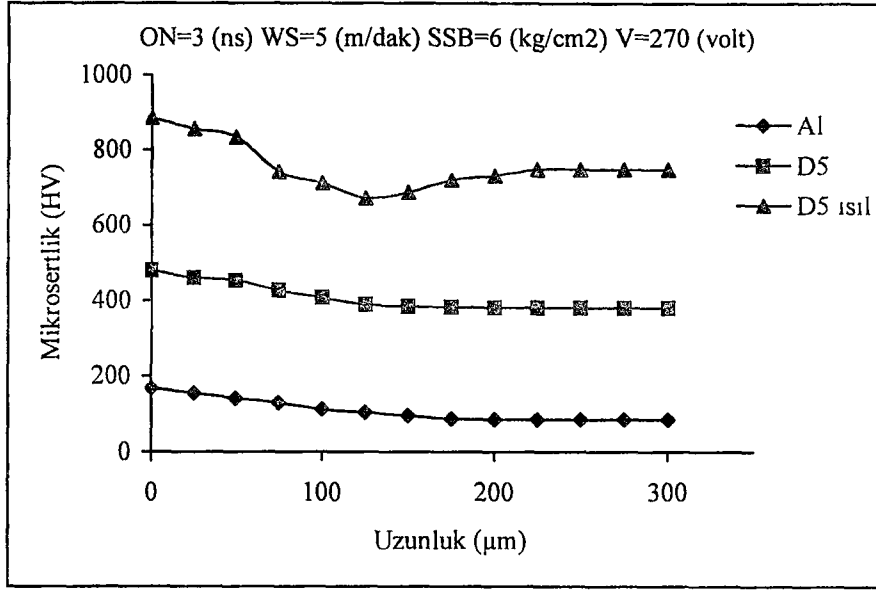
Deney Parametreleri ve Değerleri			
Puls süresi (ns)	Dielektrik sıvı basıncı (kg/cm^2)	Tel ilerleme hızı (m/dak)	Voltaj (volt)
3	6	5	100
Uzunluk (μm)	Malzeme cinsi ve mikrosertlik değerleri (HV)		
	Alüminyum	D5	D5 ısıtma işlemli
0	145	465	835
25	130	445	812
50	118	430	791
75	104	419	736
100	93	395	721
125	87	386	727
150	85	380	742
175	85	380	750
200	85	380	750
225	85	380	750
250	85	380	750
275	85	380	750
300	85	380	750



Şekil 6.28 Ana güç voltajının mikrosertliğe etkisi.

Tablo 6.9. Deney parametrelerine bağlı olarak mikrosertlik değerleri

Deney Parametreleri ve Değerleri			
Puls süresi (ns)	Dielektrik sıvı basıncı (kg/cm ²)	Tel ilerleme hızı (m/dak)	Voltaj (volt)
3	6	5	270
Uzunluk (μm)	Malzeme cinsi ve mikrosertlik değerleri (HV)		
	Alüminyum	D5	D5 ısıt ısıtılmış
0	167	480	885
25	154	460	857
50	140	453	834
75	128	426	742
100	112	408	713
125	103	390	673
150	94	384	689
175	87	382	720
200	85	380	732
225	85	380	750
250	85	380	750
275	85	380	750
300	85	380	750



Şekil 6.29 Ana güç voltajının mikrosertliğe etkisi.

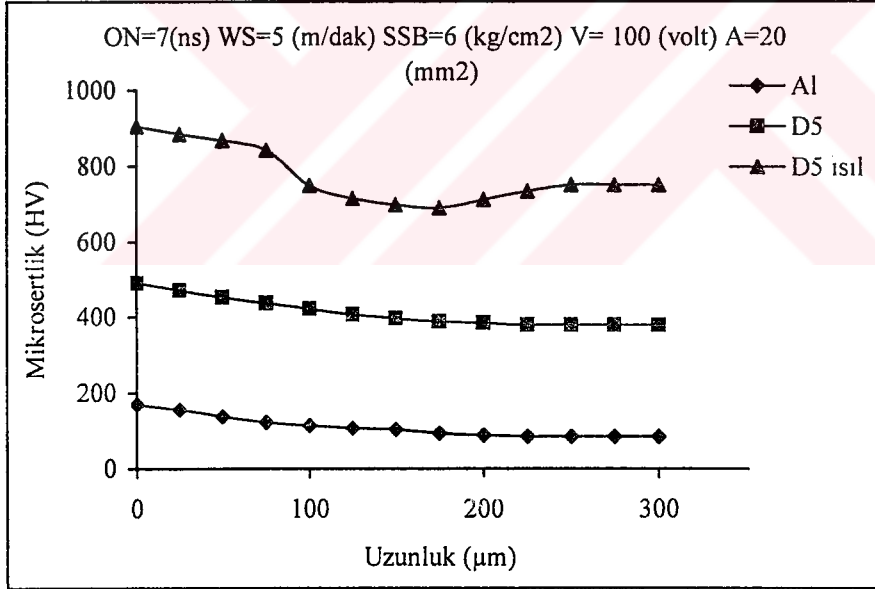
6.2.5. Kesme Alanının Etkisi

Sabit sıvı sirkülasyon basıncı (6 kg/cm²), puls süresi (7ns), tel ilerleme hızı (5 m/dak) ve gerilim (100 volt) parametreleri altında kesme alanlarının değişimi ile gerçekleştirilen kesme işlemleri neticesinde, malzemelerdeki sertlik değişim değerleri Tablo 6.10, 6.11 ve 6.12’de verilmiştir. Bu tablolardaki değerlere ait grafikler ise, Şekil 6.30, 6.31 ve 6.32’de görülmektedir.

Deneylerde kesme alanı arttıkça, yüzey sertliği belirli ölçüde azalmaktadır. Isıdan etkilenen bölge genişliği ise ihmal edilebilecek düzeyde azalmaktadır. Bu sonuçlarda, uygulanan deney şartlarında ortaya çıkan kesme enerjisinin tekabül ettiği birim alanın artmasının etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

Tablo 6.10. Deney parametrelerine bağı olarak mikrosertlik değerleri

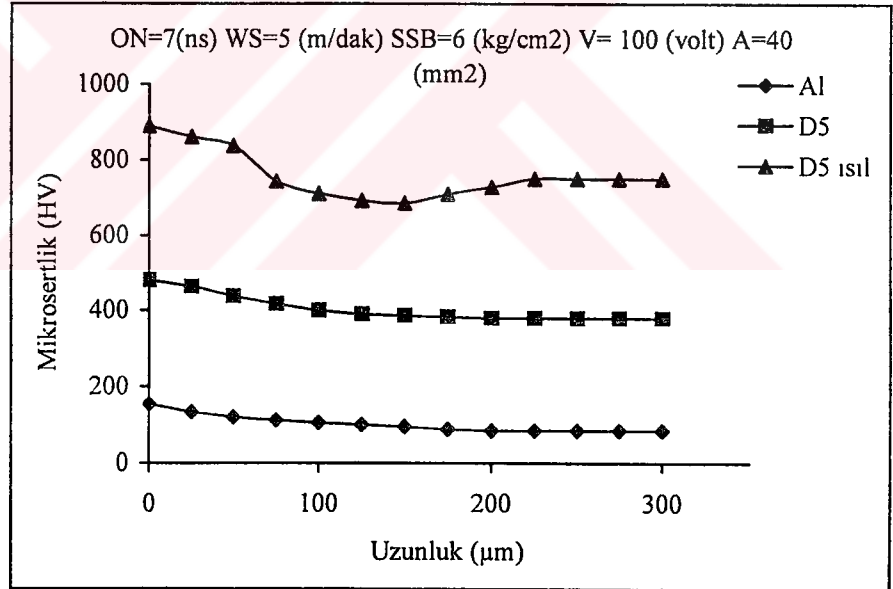
Deney Parametreleri ve Değerleri			
Puls süresi (ns)	Dielektrik sıvı basıncı (kg/cm ²)	Tel ilerleme hızı (m/dak)	Voltaj (volt)
7	6	5	100
Uzunluk (μm)	Malzeme cinsi ve mikrosertlik değerleri (HV)		
	Alüminyum	D5	D5 ısıtılmış
0	170	490	905
25	157	472	884
50	137	454	868
75	123	438	842
100	114	423	749
125	107	408	715
150	103	397	698
175	94	389	690
200	88	385	711
225	85	380	734
250	85	380	750
275	85	380	750
300	85	380	750



Şekil 6.30 Kesme alanının mikrosertliğe etkisi.

Tablo 6.11. Deney parametrelerine bağı olarak mikrosertlik değerleri

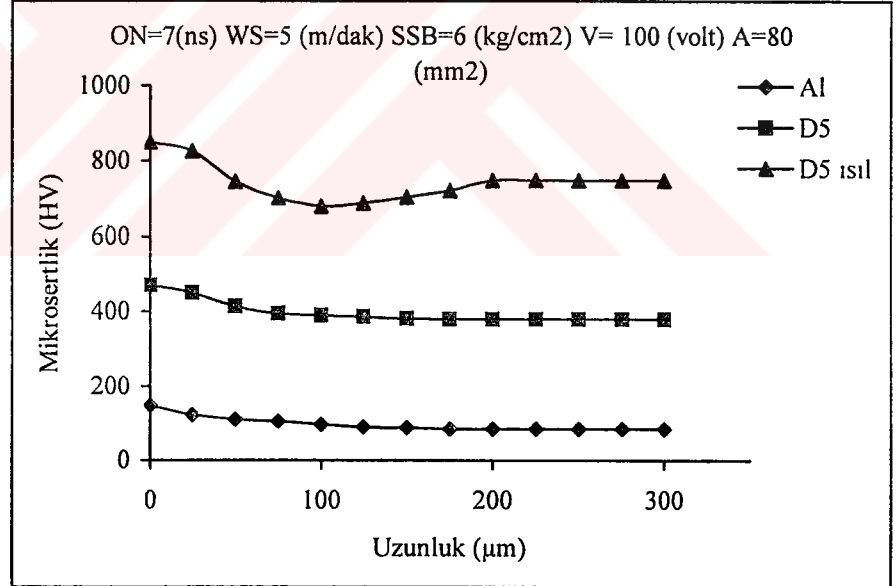
Deney Parametreleri ve Değerleri			
Puls süresi (ns)	Dielektrik sıvı basıncı (kg/cm ²)	Tel ilerleme hızı (m/dak)	Voltaj (volt)
7	6	5	100
Uzunluk (μm)	Malzeme cinsi ve mikrosertlik değerleri (HV)		
	Alüminyum	D5	D5 ısıtılmış
0	155	480	890
25	134	464	860
50	120	438	837
75	112	417	744
100	106	400	711
125	100	391	692
150	95	387	686
175	89	384	709
200	85	380	728
225	85	380	750
250	85	380	750
275	85	380	750
300	85	380	750



Şekil 6.31 Kesme alanının mikrosertliğe etkisi.

Tablo 6.12. Deney parametrelerine bağı olarak mikrosertlik değerleri

Deney Parametreleri ve Değerleri			
Puls süresi (ns)	Dielektrik sıvı basıncı (kg/cm ²)	Tel ilerleme hızı (m/dak)	Voltaj (volt)
7	6	5	100
Uzunluk (μm)	Malzeme cinsi ve mikrosertlik değerleri (HV)		
	Alüminyum	D5	D5 ısıt işlemlili
0	147	470	850
25	122	450	827
50	110	414	746
75	104	396	703
100	96	390	681
125	90	387	689
150	87	382	704
175	85	380	722
200	85	380	750
225	85	380	750
250	85	380	750
275	85	380	750
300	85	380	750



Şekil 6.32 Kesme alanının mikrosertliğe etkisi.

6.3. Yüzey Pürüzlülük Ölçüm Sonuçları

6.3.1. Puls Süresinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi

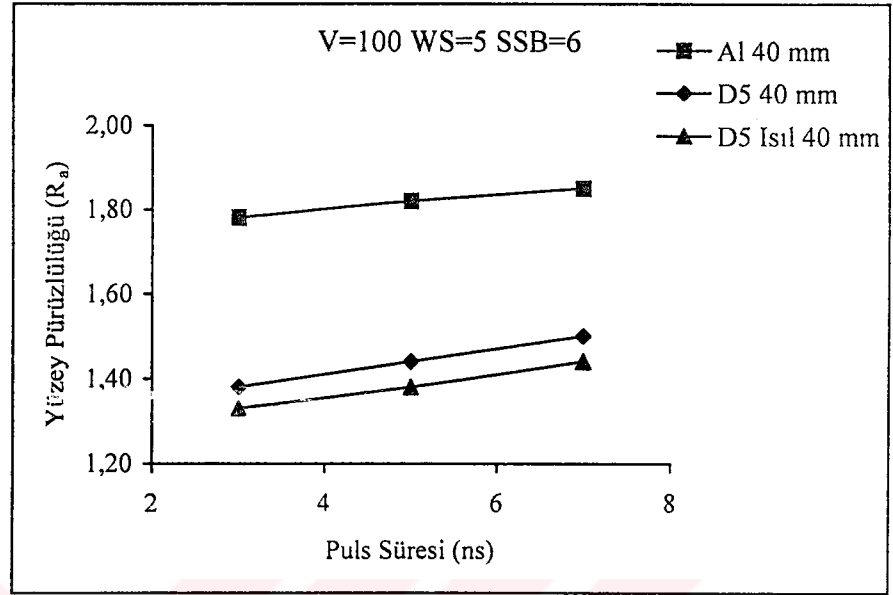
Aşağıda, Tablo 6.13’de sabit gerilim (100 V), tel ilerleme hızı (5 m/dak), sıvı sirkülasyon basıncı (6 kg/cm²) ve kesme alanı (40 mm²) parametreleri altında, değişen puls süresi parametresine göre numune yüzeylerinde meydana gelen yüzey pürüzlülük değerleri verilmiştir. Bu tablodaki değerlere ait grafik ise Şekil 6.33’de verilmiştir. Tablo 6.14’de ise yüksek voltaj (270 V) ve diğer parametrelerin sabit tutulması durumunda malzeme yüzeylerindeki yüzey pürüzlülük değerleri görülmektedir. Bu tablodaki değerlere ait grafik ise Şekil 6.34’de görülmektedir.

Grafikler incelendiğinde, aynı şartlarda kesme işlemi sonrasında numuneler mukayese edildiğinde, en fazla yüzey pürüzlülüğünün alüminyum numunelerde, en düşük pürüzlülüğün ise ısıtılmış D5 takım çeliklerinde meydana geldiği görülmektedir. Puls süresinin artırılmasına bağlı olarak bütün numunelerde yüzey pürüzlülüğü artmaktadır. Ancak, bu artış ısıtılmış D5 takım çeliğinde daha az olurken, alüminyum numunelerde daha fazla görülmektedir. Ayrıca diğer şartların sabit tutulup, gerilimin artırılması halinde, benzer sonuçlar elde edilmiştir. Ancak artan gerilim parametresine bağlı olarak bütün numunelerde yüzey pürüzlülüğü daha fazla meydana gelmiştir.

İşlemden On süresinin artırılması, daha uzun süreli kıvılcıma ve buna bağlı olarak daha fazla talaş kaldırılmasına sebep olmaktadır. Sonuç olarak, yüzeyde meydana gelen kraterler daha geniş ve daha derin olmakta, yüzey daha fazla kaba çıkmaktadır. Yine aynı şartlarda voltajın artırılması, enerji şiddetini arttırdığından yüzey pürüzlülüğü daha fazla artmaktadır.

Tablo 6.13. Düşük Gerilim Girdilerinde Puls Süresi Değişimine Göre Yüzey Pürüzlülük Değerleri.

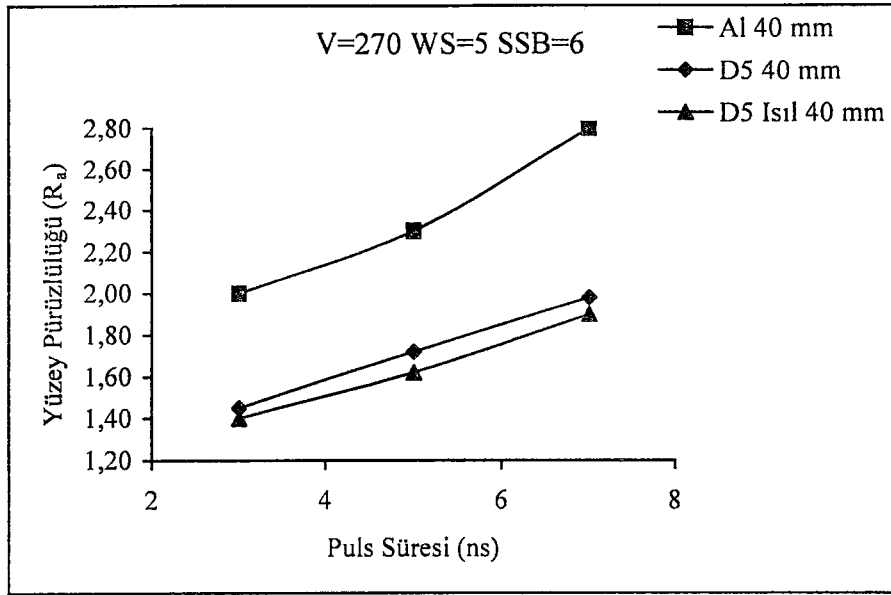
Seçilen Parametre ve Değerleri				Yüzey Pürüzlülük Değerleri (Ra)		
				Malzemenin Cinsi		
Puls Süresi	Tel İlerleme Hızı (m/dak)	Sıvı sirkülasyon basıncı (kg/cm ²)	Voltaj (volt)	Al	D5	D5 Isıl
3	5	6	100	1,78	1,38	1,33
5	5	6	100	1,82	1,44	1,38
7	5	6	100	1,85	1,50	1,44



Şekil 6.33 Puls Süresinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi.

Tablo 6.14. Yüksek Gerilim Girdilerinde Puls Süresi Değişimine Göre Yüzey Pürüzlülük Değerleri.

Seçilen Parametre ve Değerleri				Yüzey Pürüzlülük Değerleri (Ra)		
				Malzemenin Cinsi		
Puls Süresi	Tel İlerleme Hızı (m/dak)	Sıvı sirkülasyon basıncı (kg/cm ²)	Voltaj (volt)	Al	D5	D5 Isıl
3	5	6	270	2,00	1,45	1,40
5	5	6	270	2,30	1,72	1,62
7	5	6	270	2,80	1,98	1,90

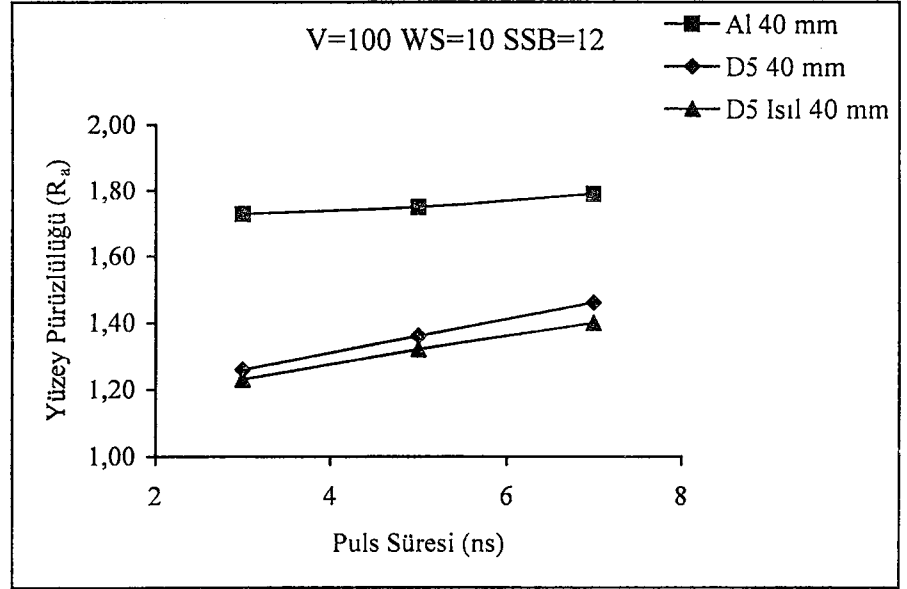


Şekil 6.34 Puls Süresinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi.

Tablo 6.13.'de verilen deney parametrelerinden tel ilerleme hızının (10 m/dak) ve sıvı sirkülasyon basıncının (12 kg/cm²) iki katına çıkarılması durumunda elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri Tablo 6.15 ve Şekil 6.35'de verilmiştir. Elde edilen veriler incelendiğinde, artan Puls süresi şartlarında, tel ilerleme hızı ve sıvı sirkülasyon basıncının artması durumunda yüzey pürüzlülüğündeki artış oranı düşmektedir. Bu oran üzerinde tel ilerleme hızının etkisinin ihmal edilecek düzeyde olduğu görülmektedir. Bu sonuçlarda, sıvı sirkülasyon basıncının artışıyla, ara bölgeden talaş parçacıklarının daha kolay uzaklaştırılması etkili olmaktadır.

Tablo 6.15. Düşük Gerilim Girdilerinde Yüzey Pürüzlülük Değerleri.

Seçilen Parametre ve Değerleri				Yüzey Pürüzlülük Değerleri (Ra)		
				Malzemenin Cinsi		
Puls Süresi	Tel İlerleme Hızı (m/dak)	Sıvı sirkülasyon basıncı (kg/cm ²)	Voltaj (volt)	Al	D5	D5 Isıl
3	10	12	100	1,73	1,26	1,23
5	10	12	100	1,75	1,36	1,32
7	10	12	100	1,79	1,46	1,40

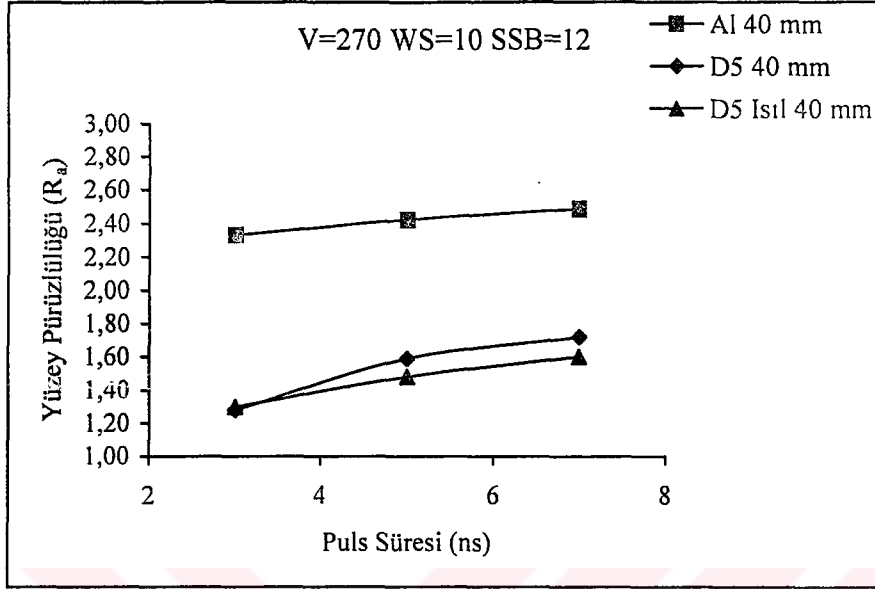


Şekil 6.35 Puls Süresinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi.

Deney parametrelerinin maksimum değerleri almalarıyla gerçekleştirilen kesme işlemleri neticesinde, malzemelerdeki yüzey pürüzlülük değerlerini Tablo 6.16 ve Şekil 6.36'da verilmiştir. Yine bu kesme işlemleri neticesinde, yüzey pürüzlülüğü artmakta, tel ilerleme hızı ve sıvı sirkülasyon basıncı yukarıda verilen sonuçlarla paralellik arz etmektedir.

Tablo 6.16. Yüksek Parametre Girdilerinde Yüzey Pürüzlülük Değerleri.

Seçilen Parametre ve Değerleri				Yüzey Pürüzlülük Değerleri (Ra)		
				Malzemenin Cinsi		
Puls Süresi	Tel İlerleme Hızı (m/dak)	Sıvı sirkülasyon basıncı (kg/cm ²)	Voltaj (volt)	Al	D5	D5 Isıl
3	10	12	270	2,33	1,28	1,30
5	10	12	270	2,42	1,59	1,48
7	10	12	270	2,49	1,72	1,60



Şekil 6.36 Puls Süresinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi.

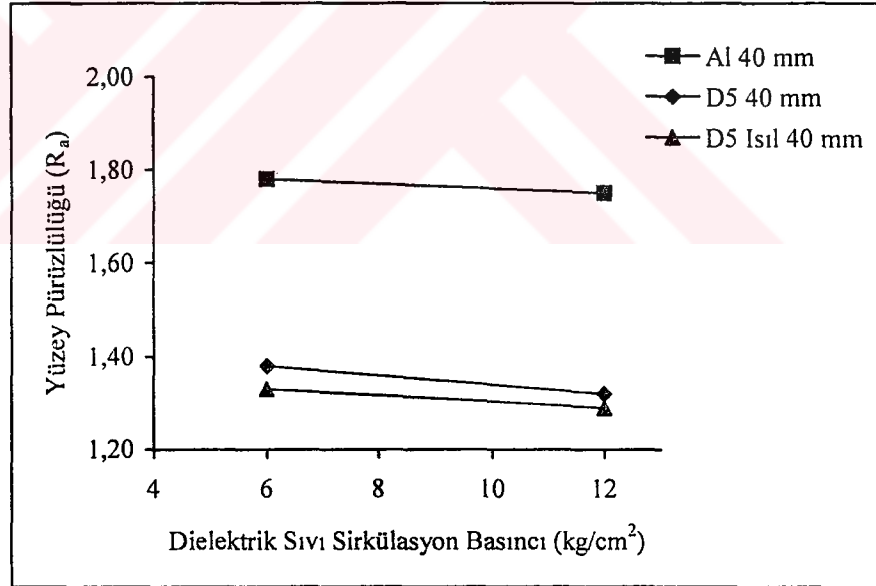
6.3.2. Sıvı Sirkülasyon Basıncının Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi

Tablo 6.17’de sabit Puls süresi (3 ns), tel ilerleme hızı (5 m/dak), gerilim (100 V) ve alan (40 mm²) şartlarında dielektrik sıvı sirkülasyon basıncının değişimi ile kesilen malzemelere ait yüzey pürüzlülük değerleri verilmiştir. Bu değerlere ait grafik Şekil 6.37’de verilmiştir. Puls süresi, tel ilerleme hızı ve gerilim değerlerinin artırılması durumundaki yüzey pürüzlülük değerleri ise Tablo 6.18 ve Şekil 6.38’de verilmiştir.

Grafikler incelendiğinde, sıvı sirkülasyon basıncının artırılmasıyla tüm numunelerdeki yüzey pürüzlülük değerlerinin azaldığı görülmektedir. Yüksek gerilim, tel ilerleme hızı ve Puls sürelerinde ise yüzey pürüzlülüğündeki azalma oranı daha fazla olmaktadır. Bilindiği gibi, tel erozyon yönteminde dielektrik sıvı hem iş parçası ve tel elektrotun soğutulmasında hem de iş parçasından kopan parçacıkların ara bölgeden uzaklaştırılmasını sağlamaktadır. Dolayısıyla, artan sıvı basıncı ara bölgeden atıkların hızlı bir şekilde uzaklaştırılmasını ve kesme işleminin kararlılığını sağlamaktadır. Sonuç olarak, ergiyik metalin yüzeyde katılaşp yapışmasını önlemekte buna bağlı olarak da yüzey pürüzlülüğü azalmaktadır.

Tablo 6.17. Düşük Gerilim Girdilerinde Sıvı Basınç Değişimine Göre Yüzey Pürüzlülük Değerleri.

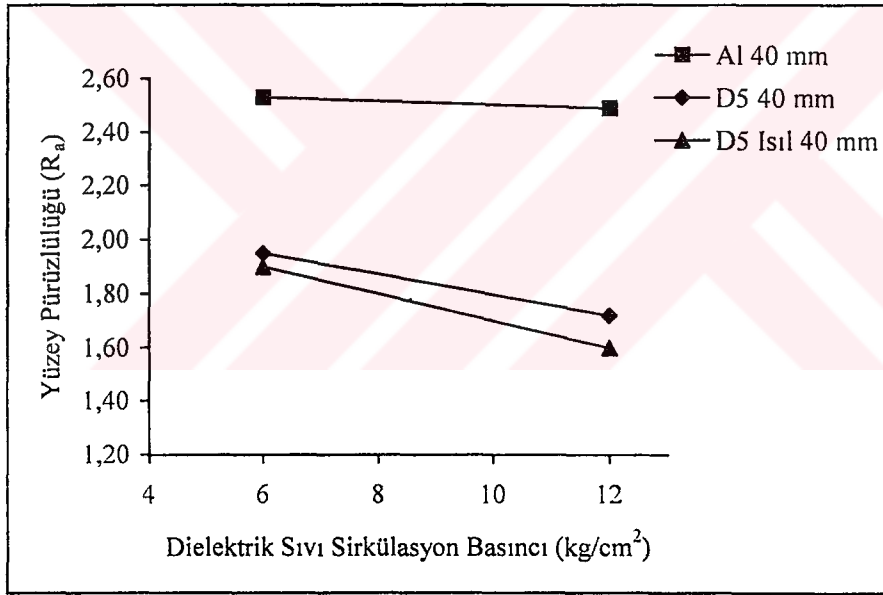
Seçilen Parametre ve Değerleri				Yüzey Pürüzlülük Değerleri (Ra)		
				Malzemenin Cinsi		
Puls Süresi	Tel İlerleme Hızı (m/dak)	Sıvı sirkülasyon basıncı (kg/cm ²)	Voltaj (volt)	Al	D5	D5 Isıl
3	5	6	100	1,78	1,38	1,33
3	5	12	100	1,75	1,32	1,29



Şekil 6.37 Puls Süresinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi.

Tablo 6.18. Yüksek Gerilim Girdilerinde Sıvı Basınç Değişimine Göre Yüzey Pürüzlülük Değerleri.

Seçilen Parametre ve Değerleri				Yüzey Pürüzlülük Değerleri (Ra)		
				Malzemenin Cinsi		
Puls Süresi	Tel İlerleme Hızı (m/dak)	Sıvı Sirkülasyon basıncı (kg/cm ²)	Voltaj (volt)	Al	D5	D5 Isıl
7	10	6	270	2,53	1,95	1,90
7	10	12	270	2,49	1,72	1,60



Şekil 6.38 Dielektrik Sıvı Basıncının Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi.

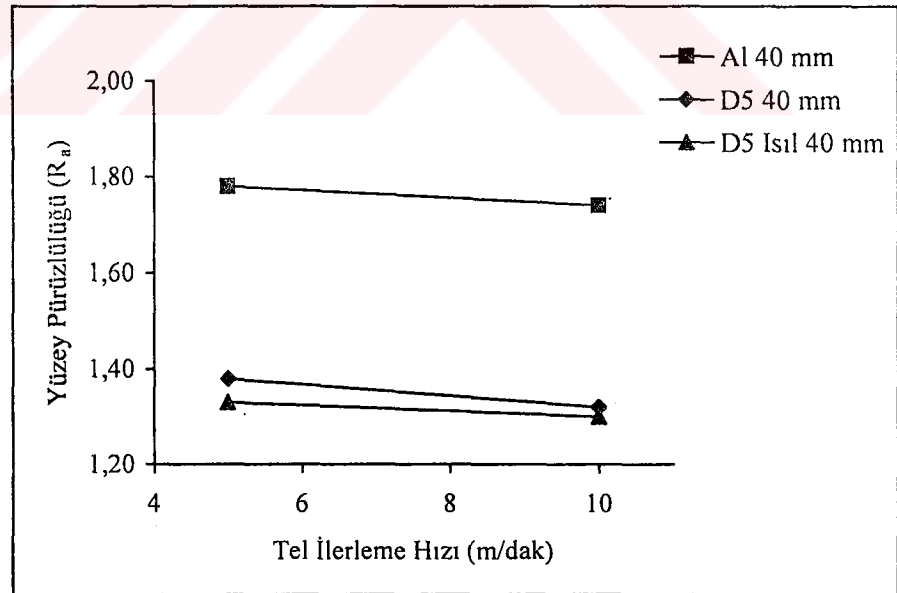
6.3.3. Tel İlerleme Hızının Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi

Tablo 6.19’da sabit Puls süresi (3 ns), sıvı sirkülasyon basıncı (6 kg/ cm²), gerilim (100 V) ve alan (40 mm²) şartlarında tel ilerleme hızının değişimi ile kesilen malzemelere ait yüzey pürüzlülük değerleri verilmiştir. Bu değerlere ait grafik Şekil 6.39’da verilmiştir. Puls süresi, dielektrik sıvı sirkülasyon basıncı ve gerilim değerlerinin arttırılması durumundaki yüzey pürüzlülük değerleri ise Tablo 6.20 ve Şekil 6.40’da verilmiştir.

Grafiklerde görüldüğü gibi, artan tel ilerleme hızının tüm numunelerde yüzey pürüzlülük değişimi üzerinde belirgin bir etkiye sahip olmadığı tespit edilmiştir. Ancak, özellikle yüksek gerilim ve Puls sürelerinde, zaman zaman görülen tel kopmalarının yüksek tel hızlarında daha az görüldüğü tespit edilmiştir. Çünkü, birim zamanda tel yüzeyine tekabül eden kıvılcım, tel boyuna daha geniş aralıkta yayılmaktadır. Dolayısıyla tel yüzeyinde oluşan kraterler birbiri üzerinde oluşmamakta buda telin mukavemetinin düşmesini önlemektedir.

Tablo 6.19. Düşük Gerilim Girdilerinde Tel İlerleme Hızı Değişimine Göre Yüzey Pürüzlülük Değerleri.

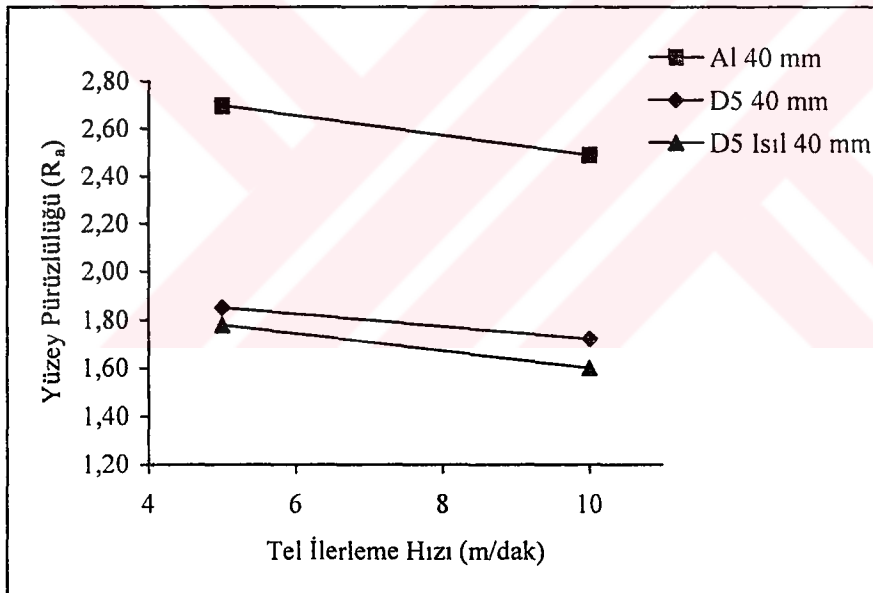
Seçilen Parametre ve Değerleri				Yüzey Pürüzlülük Değerleri (Ra)		
				Malzemenin Cinsi		
Puls Süresi	Tel İlerleme Hızı (m/dak)	Sıvı sirkülasyon basıncı (kg/cm ²)	Voltaj (volt)	Al	D5	D5 Isıl
3	5	6	100	1,78	1,38	1,33
3	10	6	100	1,74	1,32	1,30



Şekil 6.39 Tel İlerleme Hızının Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi.

Tablo 6.20. Yüksek Gerilim Girdilerinde Puls Süresi Değişimine Göre Yüzey Pürüzlülük Değerleri.

Seçilen Parametre ve Değerleri				Yüzey Pürüzlülük Değerleri (Ra)		
				Malzemenin Cinsi		
Puls Süresi	Tel İlerleme Hızı (m/dak)	Sıvı Sirkülasyon basıncı (kg/cm ²)	Voltaj (volt)	Al	D5	D5 Isıl
7	5	12	270	2,70	1,85	1,78
7	10	12	270	2,49	1,72	1,60



Şekil 6.40 Tel İlerleme Hızının Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi.

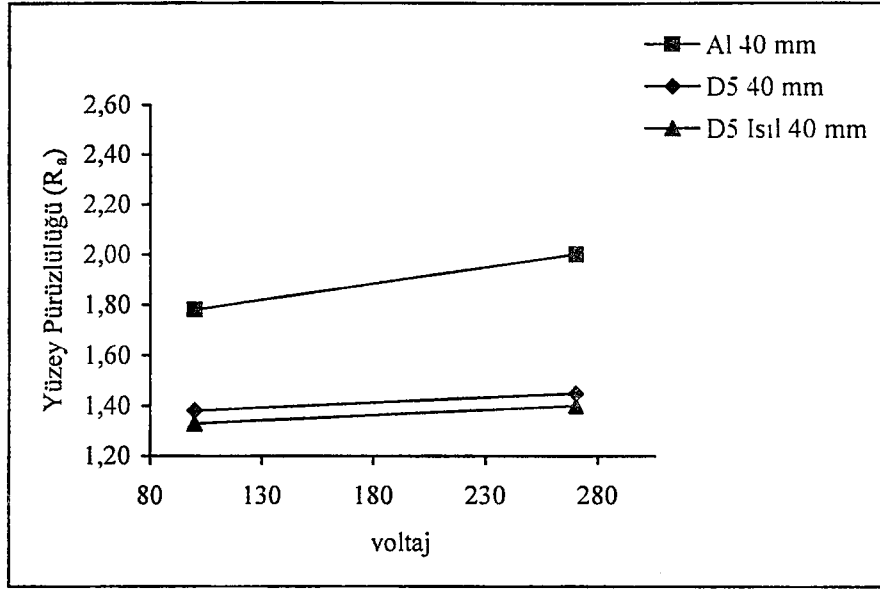
6.3.4. Ana Güç Voltajının Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi

Tablo 6.21’de sabit Puls süresi (3 ns), sıvı sirkülasyon basıncı (6 kg/ cm²), tel ilerleme hızı (5 m/dak) ve alan (40 mm²) şartlarında gerilim parametresinin değişimi ile kesilen malzemelere ait yüzey pürüzlülük değerleri verilmiştir. Bu değerlere ait grafik Şekil 6.41’de verilmiştir. Puls süresi, dielektrik sıvı sirkülasyon basıncı ve tel ilerleme hızının artırılması durumundaki yüzey pürüzlülük değerleri ise Tablo 6.22 ve Şekil 6.42’de verilmiştir.

Artan gerilim değerlerine bağlı olarak tüm numunelerde yüzey pürüzlülük değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. Oransal olarak düşünüldüğünde bu artış, yine alüminyum numunelerde ergime sıcaklığına bağlı olarak daha fazla görülmektedir. Gerilimin, her kıvılcım boşalımında tele uygulanan enerji yoğunluğu olduğu dikkate alındığında, bu enerji şiddetinin artırılması durumunda telden iş parçasına birim Puls süresinde fırlatılan elektron sayısının daha fazla olacağı ve buna bağlı olarak da üretilen kıvılcım şiddetinin artacağı düşünüldüğünde, malzeme yüzeyinde oluşan kraterlerin boyut ve sayılarının artacağı söylenebilir. Sonuç olarak, gerilim parametresinin diğer parametrelerle mukayese edildiğinde, yüzey pürüzlülüğü üzerinde en fazla etkili olduğu görülmektedir.

Tablo 6.21. Düşük Parametre Girdilerinde Gerilim Değişimine Göre Yüzey Pürüzlülük Değerleri.

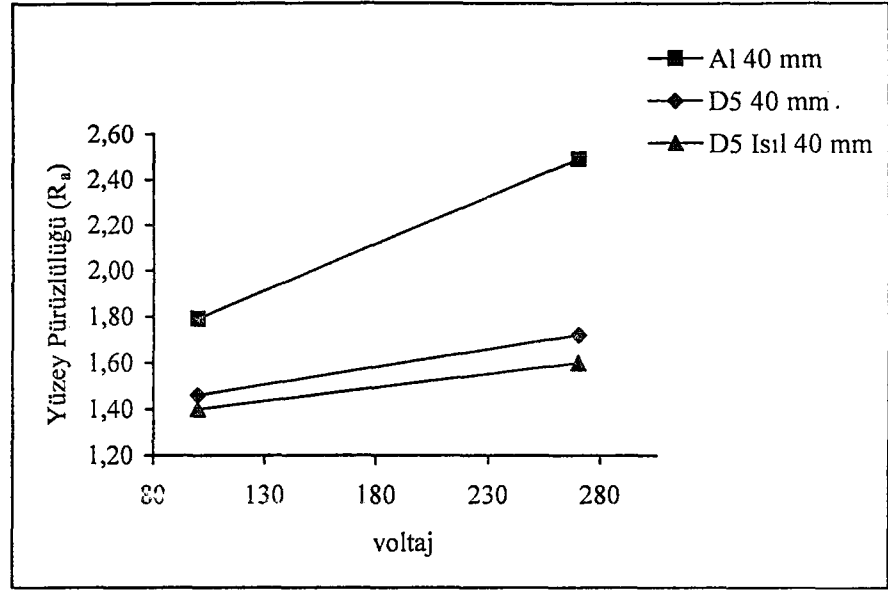
Seçilen Parametre ve Değerleri				Yüzey Pürüzlülük Değerleri (Ra)		
				Malzemenin Cinsi		
Puls Süresi	Tel İlerleme Hızı (m/dak)	Sıvı sirkülasyon basıncı (kg/cm ²)	Voltaj (volt)	Al	D5	D5 Isıl
3	5	6	100	1,78	1,38	1,33
3	5	6	270	2,00	1,45	1,40



Şekil 6.41 Voltajın Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi.

Tablo 6.22. Yüksek Parametre Girdilerinde Gerilim Değişimine Göre Yüzey Pürüzlülük Değerleri.

Seçilen Parametre ve Değerleri				Yüzey Pürüzlülük Değerleri (Ra)		
				Malzemenin Cinsi		
Puls Süresi	Tel İlerleme Hızı (m/dak)	Sıvı sirkülasyon basıncı (kg/cm ²)	Voltaj (volt)	Al	D5	D5 Isıl
7	10	12	100	1,79	1,46	1,40
7	10	12	270	2,49	1,72	1,60



Şekil 6.42 Voltajın Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi.

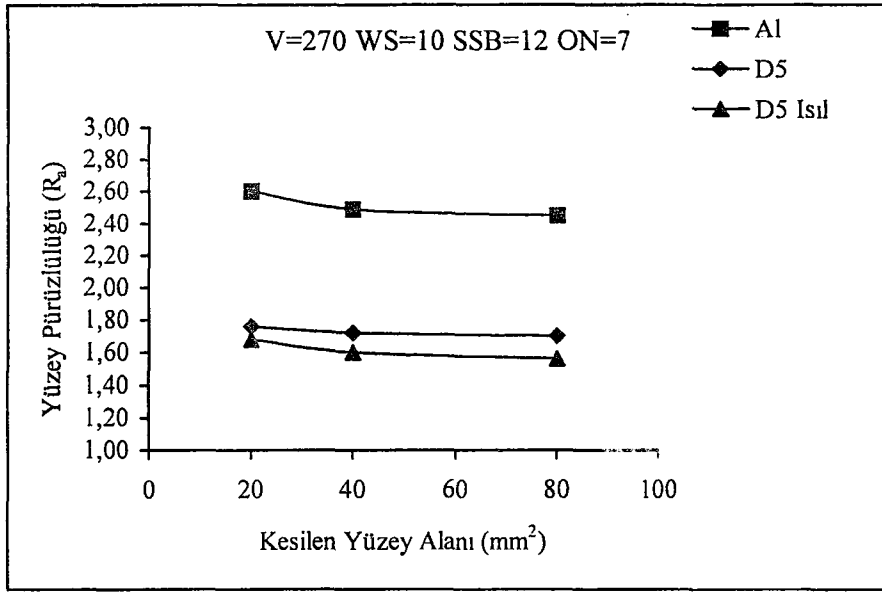
6.3.5. Kesme Alanının Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi

Tablo 6.23’de sabit Puls süresi (7 ns), sıvı sirkülasyon basıncı (12 kg/cm^2), tel ilerleme hızı (10m/dak) ve gerilim (270 volt) şartlarında, işlenen yüzey alanlarının değişimi ile kesilen malzemelere ait yüzey pürüzlülük değerleri verilmiştir. Bu değerlere ait grafik Şekil 6.43’de verilmiştir. Puls süresi ve dielektrik sıvı sirkülasyon basıncının azalması durumundaki yüzey pürüzlülük değerleri ise Tablo 6.24 ve Şekil 6.44’de verilmiştir.

Malzemelerin kesilen yüzey alanlarının artmasıyla, tüm numunelerdeki yüzey pürüzlülük değerlerinin azaldığı görülmektedir. Bilindiği gibi kesme işlemi esnasında, sürekli olarak tezgaha ait servo kontrol ünitesi tel ile iş parçası arasındaki kıvılcım aralığını sabit bir değerde tutmaktadır. Kesme alanı arttıkça, enerji dağılımı daha geniş bir yüzeye tekabül etmekte dolayısıyla, talaş kaldırma hızı düşmektedir. Daha kararlı bir kesme gerçekleşmekte ve yüzey pürüzlülüğü azalmaktadır.

Tablo 6.23. Yüksek Gerilim Girdilerinde Kesilen Yüzey Alanı Değişimine Göre Yüzey Pürüzlülük Değerleri.

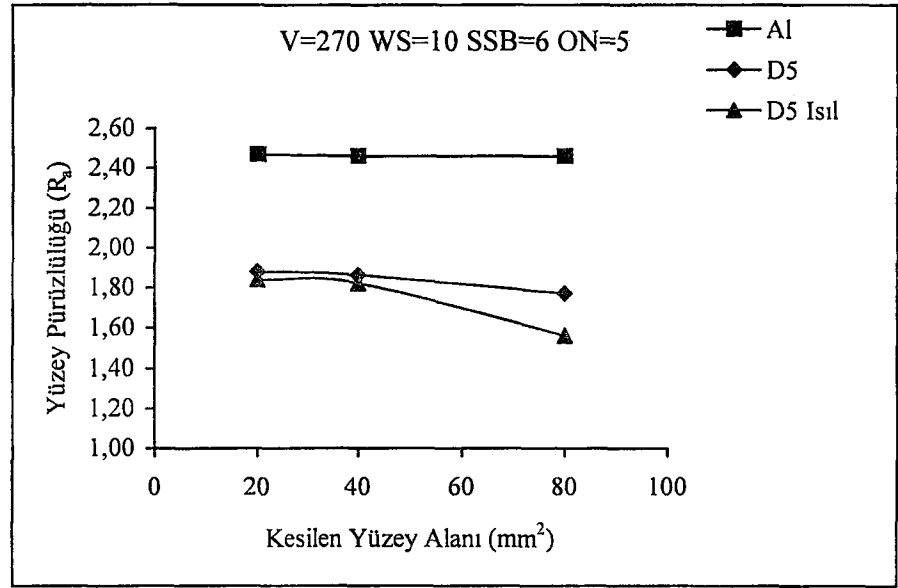
İşlenen Yüzey Alanı (mm ²)	Yüzey Pürüzlülük Değerleri (Ra)		
	Malzemenin Cinsi		
	Al	D5	D5 Isıl
20	2,60	1,76	1,68
40	2,49	1,72	1,60
80	2,45	1,70	1,56



Şekil 6.43 Kesilen Yüzey Alanının Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi.

Tablo 6.24. Yüksek Gerilim Girdilerinde Kesilen Yüzey Alanı Değişimine Göre Yüzey Pürüzlülük Değerleri.

İşlenen Yüzey Alanı (mm ²)	Yüzey Pürüzlülük Değerleri (Ra)		
	Malzemenin Cinsi		
	Al	D5	D5 Isıl
20	2,47	1,88	1,84
40	2,46	1,86	1,82
80	2,46	1,77	1,56



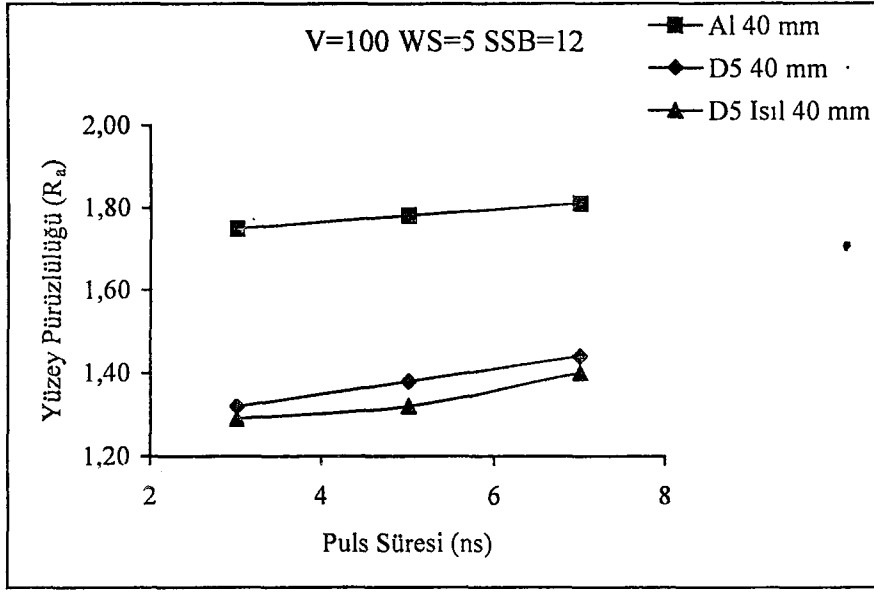
Şekil 6.44 Kesilen Yüzey Alanının Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi.

Sonuç olarak seçilen değişken parametrelerin yüzey pürüzlülüklerine olan etkileri tartışıldı. Gerilim (V) ve Puls süresi (ON) parametrelerinin yüzey pürüzlülüklerini arttırdığı ancak, tel ilerleme hızı (WS) ve dielektrik sıvı sirkülasyon basıncı (SSB) parametrelerinin de gerilim ve Puls süresi altında gerçekleştirilen kesmelerde artan pürüzlülük miktarlarını azalttığı tespit edildi. Bununla birlikte, kesilen yüzey alanının artmasıyla malzemelerdeki pürüzlülük oranlarının azaldığı görüldü.

Gerçekleştirilen tüm deneyler, çoklu parametre kombinasyonlarına dayandığından, bu parametrelerin kendi içlerinde gerçekleştirilen değişim döngüleriyle malzemelerdeki elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri ise, Tablo 6.25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32 ve Şekil 6.45, 46, 47, 48, 49, 50, 51 ve 52’de görülmektedir. Yukarıda açıklanan parametre etkileri doğrultusunda aşağıdaki şekil ve tablolarda da aynı durumdan söz edilmektedir.

Tablo 6.25. Parametre İçeriklerine Göre Yüzey Pürüzlülük Değerleri.

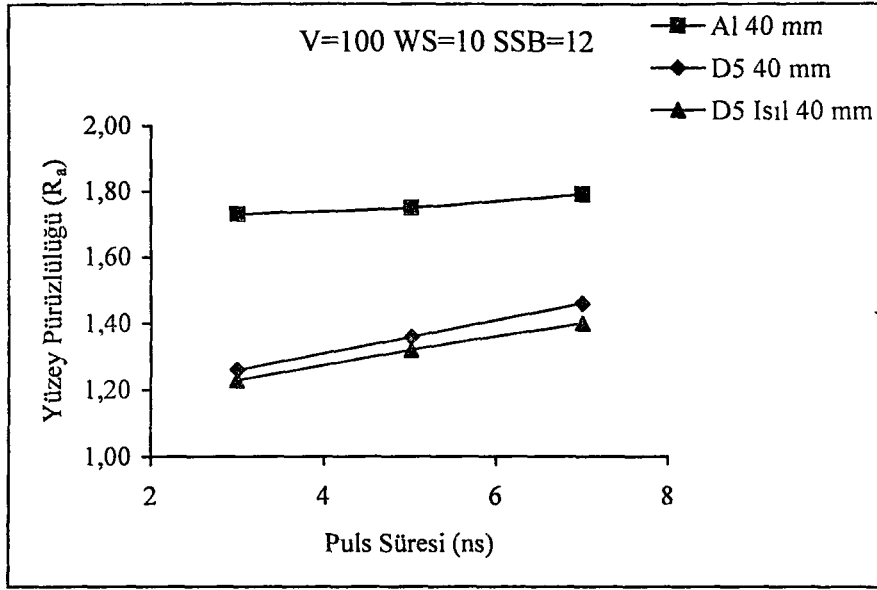
Seçilen Parametre ve Değerleri				Yüzey Pürüzlülük Değerleri (Ra)		
				Malzemenin Cinsi		
Puls Süresi	Tel İlerleme Hızı (m/dak)	Sıvı sirkülasyon basıncı (kg/cm2)	Voltaj (volt)	Al	D5	D5 Isıl
3	5	12	100	1,75	1,32	1,29
5	5	12	100	1,78	1,38	1,32
7	5	12	100	1,81	1,44	1,40



Şekil 6.45 Parametrelerin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi.

Tablo 6.26. Parametre İçeriklerine Göre Yüzey Pürüzlülük Değerleri.

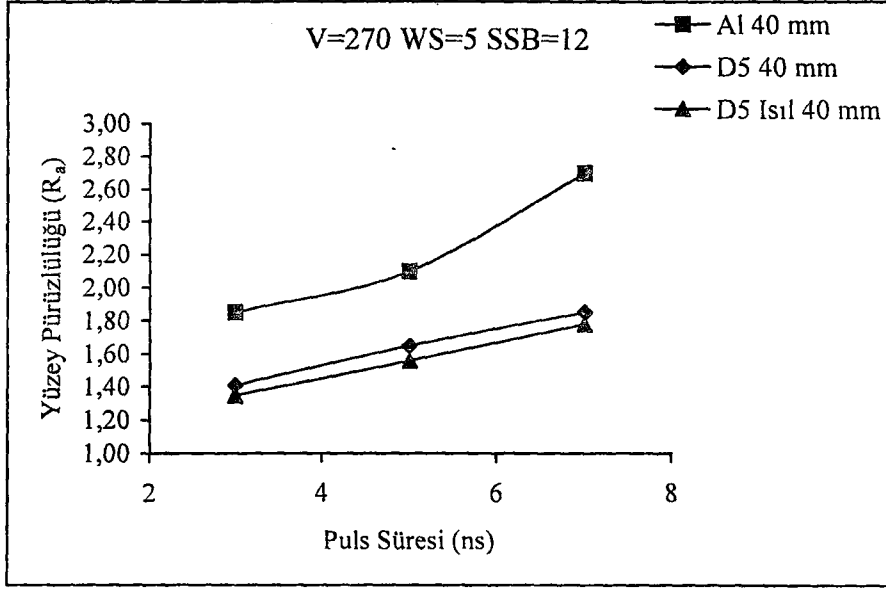
Seçilen Parametre ve Değerleri				Yüzey Pürüzlülük Değerleri (R_a)		
				Malzemenin Cinsi		
Puls Süresi	Tel İlerleme Hızı (m/dak)	Sıvı sirkülasyon basıncı (kg/cm ²)	Voltaj (volt)	Al	D5	D5 Isıl
3	10	12	100	1,73	1,26	1,23
5	10	12	100	1,75	1,36	1,32
7	10	12	100	1,79	1,46	1,40



Şekil 6.46 Parametrelerin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi.

Tablo 6.27. Parametre İçeriklerine Göre Yüzey Pürüzlülük Değerleri.

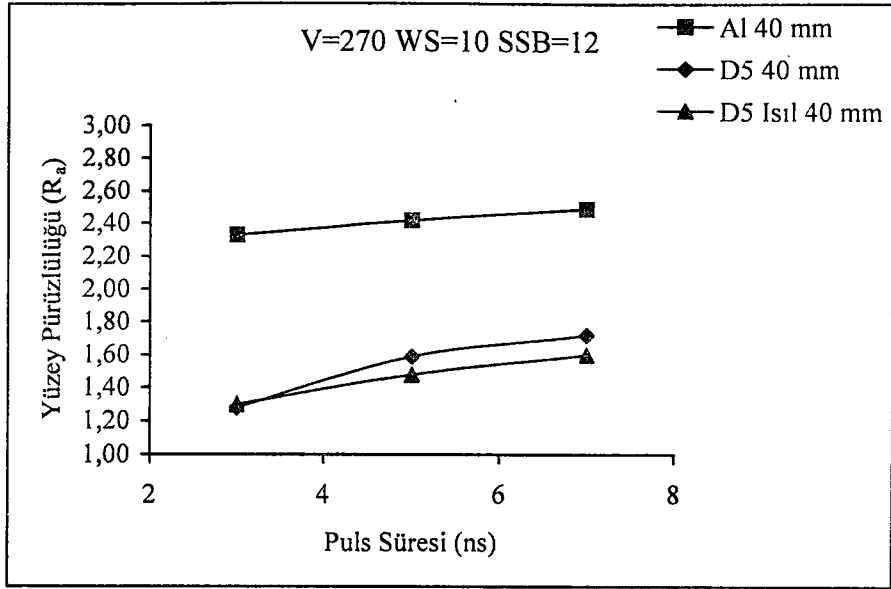
Seçilen Parametre ve Değerleri				Yüzey Pürüzlülük Değerleri (Ra)		
				Malzemenin Cinsi		
Puls Süresi	Tel İlerleme Hızı (m/dak)	Sıvı sirkülasyon basıncı (kg/cm ²)	Voltaj (volt)	Al	D5	D5 Isıl
3	5	12	270	1,85	1,41	1,35
5	5	12	270	2,10	1,65	1,56
7	5	12	270	2,70	1,85	1,78



Şekil 6.47 Parametrelerin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi.

Tablo 6.28. Parametre İçeriklerine Göre Yüzey Pürüzlülük Değerleri.

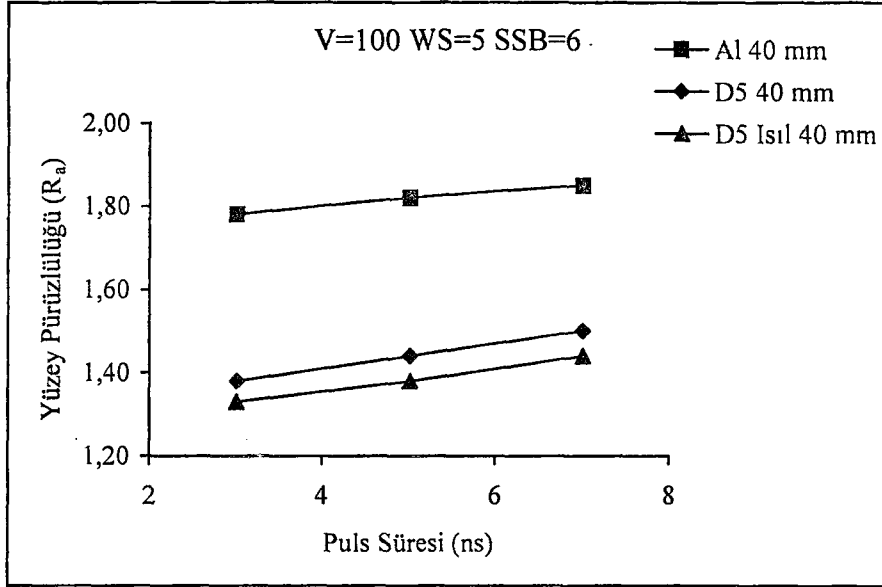
Seçilen Parametre ve Değerleri				Yüzey Pürüzlülük Değerleri (Ra)		
				Malzemenin Cinsi		
Puls Süresi	Tel İlerleme Hızı (m/dak)	Sıvı sirkülasyon basıncı (kg/cm ²)	Voltaj (volt)	Al	D5	D5 Isıl
3	10	12	270	2,33	1,28	1,30
5	10	12	270	2,42	1,59	1,48
7	10	12	270	2,49	1,72	1,60



Şekil 6.48 Parametrelerin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi.

Tablo 6.29. Parametre İçeriklerine Göre Yüzey Pürüzlülük Değerleri.

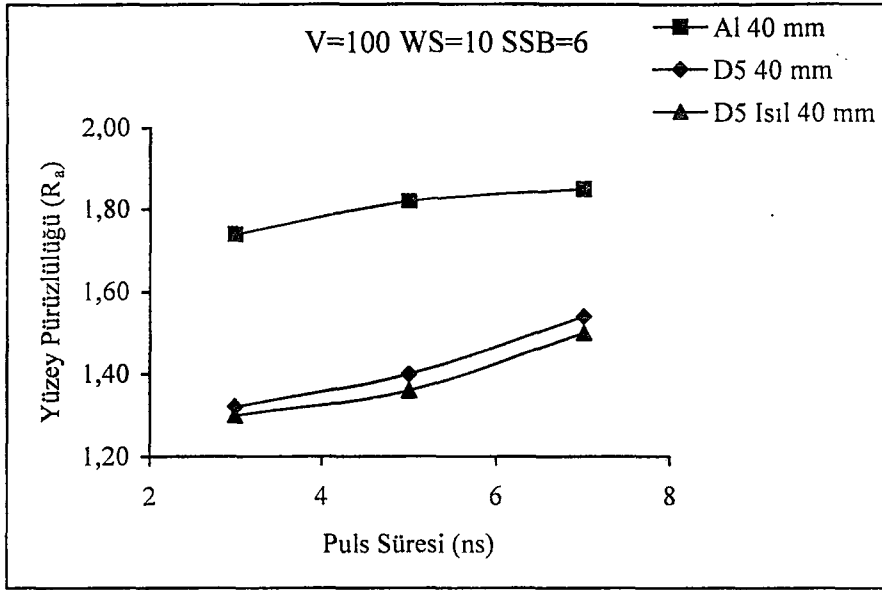
Seçilen Parametre ve Değerleri				Yüzey Pürüzlülük Değerleri (Ra)		
				Malzemenin Cinsi		
Puls Süresi	Tel İlerleme Hızı (m/dak)	Sıvı sirkülasyon basıncı (kg/cm ²)	Voltaj (volt)	Al	D5	D5 Isıl
3	5	6	100	1,78	1,38	1,33
5	5	6	100	1,82	1,44	1,38
7	5	6	100	1,85	1,50	1,44



Şekil 6.49 Parametrelerin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi.

Tablo 6.30. Parametre İçeriklerine Göre Yüzey Pürüzlülük Değerleri.

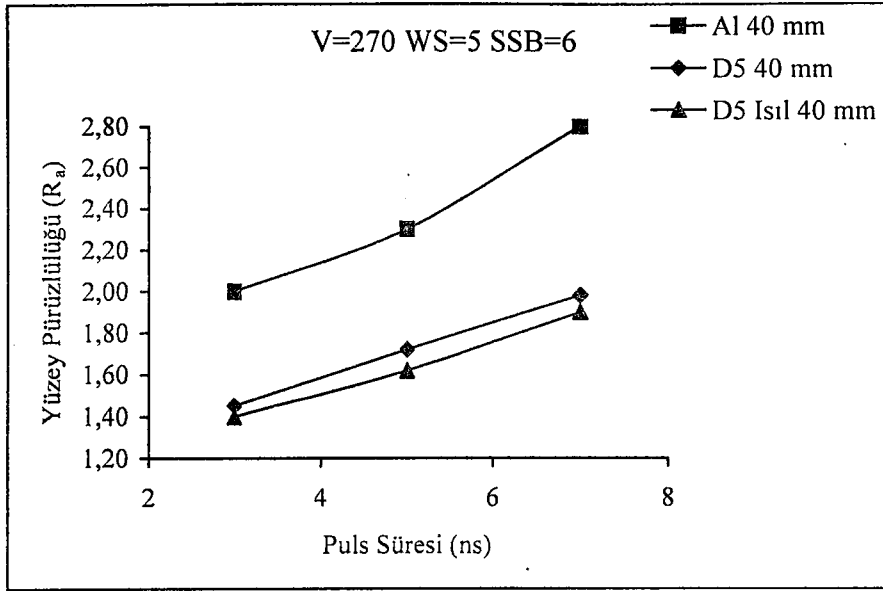
Seçilen Parametre ve Değerleri				Yüzey Pürüzlülük Değerleri (Ra)		
				Malzemenin Cinsi		
Puls Süresi	Tel İlerleme Hızı (m/dak)	Sıvı sirkülasyon basıncı (kg/cm ²)	Voltaj (volt)	Al	D5	D5 Isıl
3	10	6	100	1,74	1,32	1,30
5	10	6	100	1,82	1,40	1,36
7	10	6	100	1,85	1,54	1,50



Şekil 6.50 Parametrelerin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi.

Tablo 6.31. Parametre İçeriklerine Göre Yüzey Pürüzlülük Değerleri.

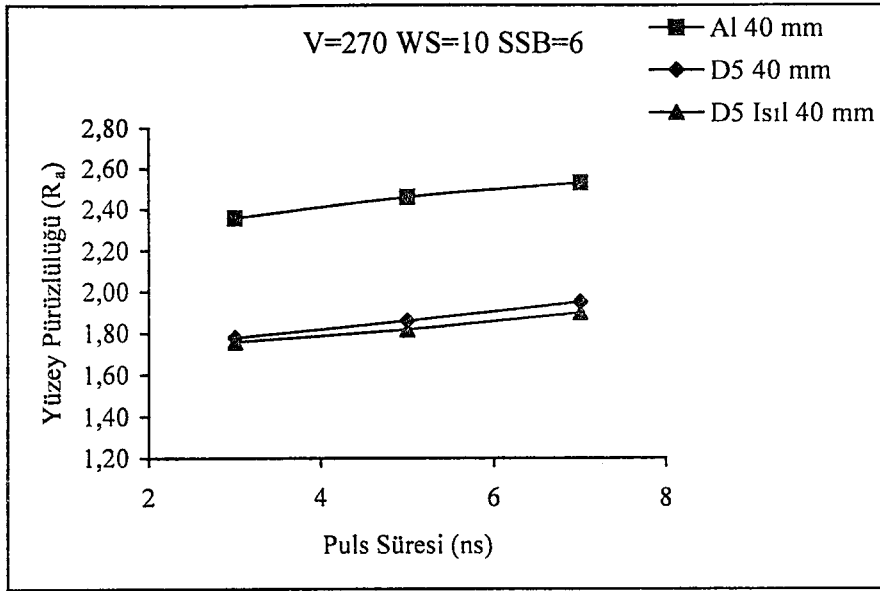
Seçilen Parametre ve Değerleri				Yüzey Pürüzlülük Değerleri (Ra)		
				Malzemenin Cinsi		
Puls Süresi	Tel İlerleme Hızı (m/dak)	Sıvı sirkülasyon basıncı (kg/cm ²)	Voltaj (volt)	Al	D5	D5 Isıl
3	5	6	270	2,00	1,45	1,40
5	5	6	270	2,30	1,72	1,62
7	5	6	270	2,80	1,98	1,90



Şekil 6.51 Parametrelerin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi.

Tablo 6.32. Parametre İçeriklerine Göre Yüzey Pürüzlülük Değerleri.

Seçilen Parametre ve Değerleri				Yüzey Pürüzlülük Değerleri (R_a)		
				Malzemenin Cinsi		
Puls Süresi	Tel İlerleme Hızı (m/dak)	Sıvı sirkülasyon basıncı (kg/cm ²)	Voltaj (volt)	Al	D5	D5 Isıl
3	10	6	270	2,36	1,78	1,76
5	10	6	270	2,46	1,86	1,82
7	10	6	270	2,53	1,95	1,90



Şekil 6.52 Parametrelerin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi.

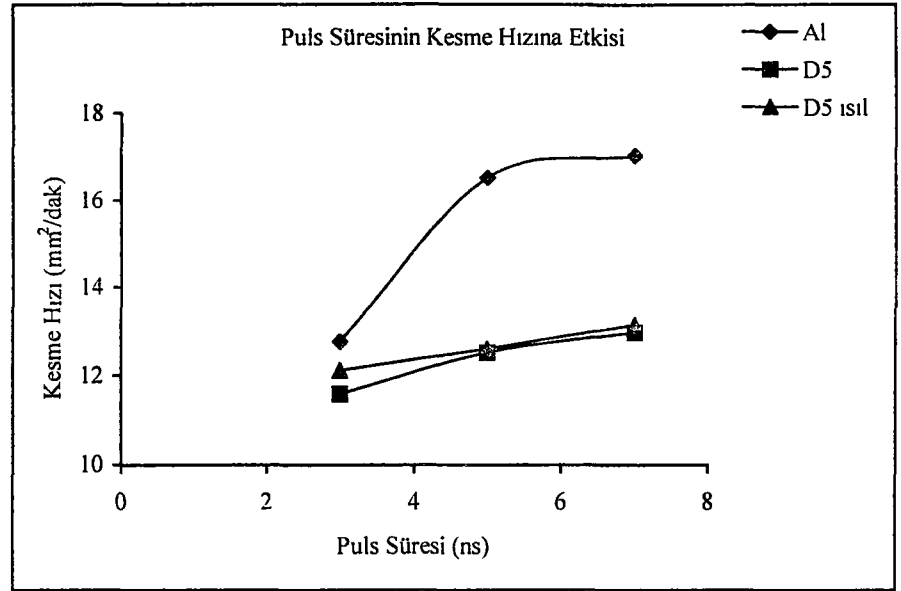
6.4. Kesme Hızı Deney Sonuçları

Tablo 6.33’de Puls süresi değişimine göre, Tablo 6.34’de gerilim değişimine göre, Tablo 6.35’de tel ilerleme hızı değişimine göre ve Tablo 6.36’de de sıvı sirkülasyon basıncının değişimlerine göre kesme hızı değerleri verilmiştir. Bu tablo değerlerine ait grafikler ise sırasıyla Şekil 6.53, Şekil 6.54, Şekil 6.55 ve Şekil 6.56’da görülmektedir.

Grafikler genel olarak değerlendirildiğinde artan Puls süresi ve gerilim değerlerine bağlı olarak, kesme hızlarının önemli ölçüde arttığı buna karşın, tel ilerleme hızı ve sıvı sirkülasyon basınçlarının kesme hızları üzerinde nispeten ihmal edilebilecek düzeyde olduğu görülmektedir. Malzeme cinsi olarak, grafikler incelendiğinde alüminyum numunelerin ergime sıcaklıklarının düşük olmasından dolayı takım çeliği numunelerine nazaran, talaş kaldırma hızının daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Isıl işlemlili ve ısıl işlemsiz numunelerde belirgin bir fark olmamakla beraber ısıl işlemlili numunelerin talaş kaldırma hızının daha düşük olduğu görülmektedir.

Tablo 6.33. Puls Süresi Değişimine Göre Kesme Hızı Değerleri.

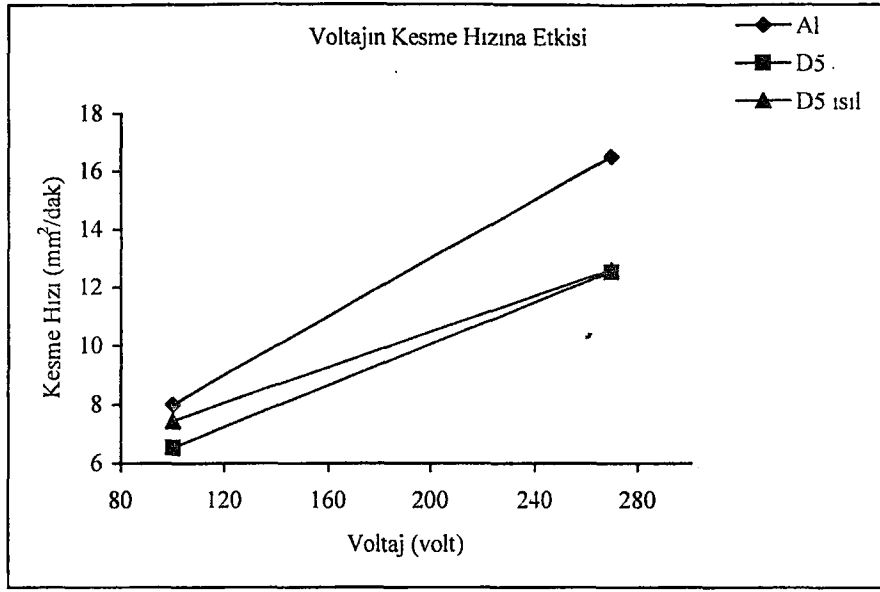
Puls süresi (ns)	Malzemenin Cinsine Göre Kesme Hızı (mm ² /dak)		
	Al	D5 ısııl	D5
3	12,77	11,59	12,12
5	16,52	12,53	12,61
7	17,02	12,98	13,15



Şekil 6.53 Puls Süresinin Kesme Hızına Etkisi.

Tablo 6.34. Gerilim Değişimine Göre Kesme Hızı Değerleri.

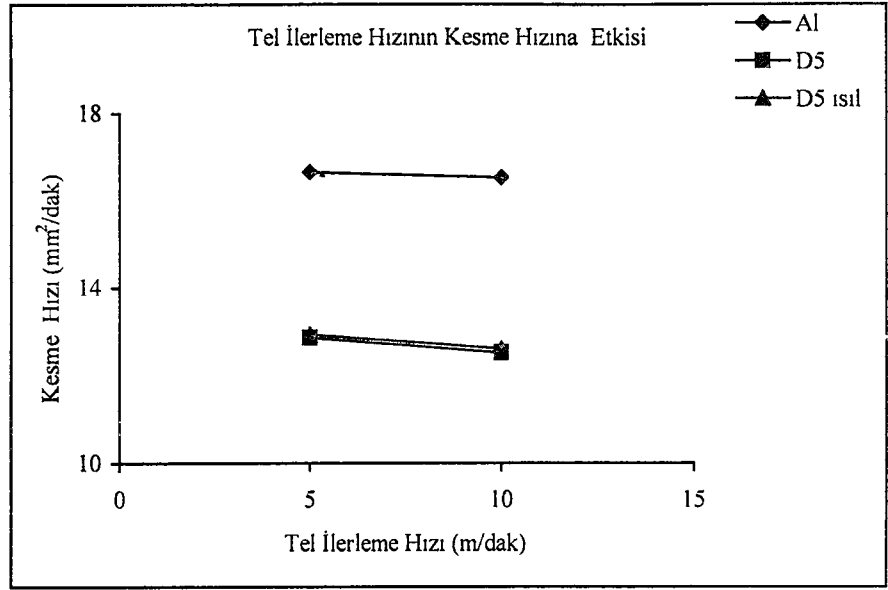
Voltaj (volt)	Malzemenin Cinsine Göre Kesme Hızı (mm ² /dak)		
	Al	D5 ısıt	D5
100	8	6,53	7,44
270	16,52	12,53	12,61



Şekil 6.54 Gerilimin Kesme Hızına Etkisi.

Tablo 6.35. Tel İlerleme Hızının Değişimine Göre Kesme Hızı Değerleri.

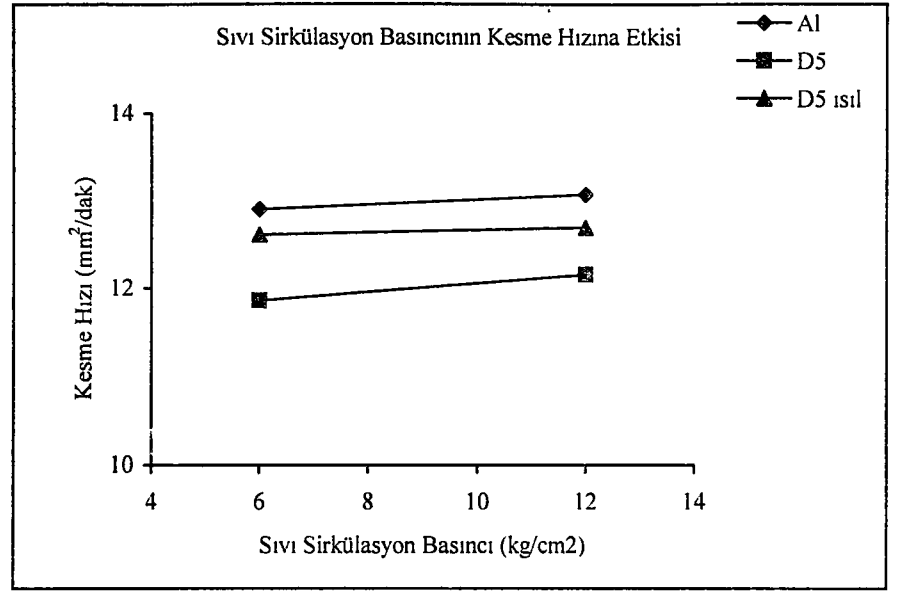
Tel İlerleme Hızı (m/dak)	Malzeme Cinsine Kesme Hızı (mm ² /dak)		
	Al	D5 ısıt	D5
5	16,66	12,86	12,94
10	16,52	12,53	12,61



Şekil 6.55 Tel İlerleme Hızının Kesme Hızına Etkisi.

Tablo 6.36. Sıvı Sirkülasyon Basınç Değişimine Göre Kesme Hızı Değerleri.

Sıvı Sirkülasyon Basıncı (kg/cm ²)	Malzeme Cinsine Göre Kesme Hızı (mm ² /dak)		
	Al	D5 ısıt	D5
6	12,90	11,86	12,61
12	13,07	12,15	12,69



Şekil 6.56 Sıvı Sirkülasyon Basıncının Kesme Hızına Etkisi.

7. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu araştırmada, farklı kesme alanlarına sahip alüminyum, D5 takım çeliği ve D5 Isıl işlemli takım çeliklerinin tel erozyon yönteminde, gerilim, puls süresi, tel ilerleme hızı ve dielektrik sıvı sirkülasyonu basınç parametrelerine bağlı olarak, malzemelerde meydana gelen yüzey pürüzlülük ve mikrosertlik değişimleri incelenmiş, elde edilen sonuçlar tartışılarak yorumlanmıştır. Bu çalışma sonunda elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

Tel erozyonla kesme işlemi sonucunda, yüzeyde Beyaz tabaka olarak isimlendirilen çok sert bir tabaka oluşmaktadır. Bu tabakanın yapısından dolayı, yüzey sertliği artmaktadır. Yüzeyden itibaren ana yapıya doğru sertlik azalması görülmektedir. Isıl işlemli D5 takım çeliklerinde diğer numunelerden farklı olarak yüzey altında aşırı temperlenmiş veya tavlanmış bir yapı görülmekte, bu da bu bölgedeki sertliğin ana matris sertliğinin altına kadar düşmesine neden olmaktadır. Alüminyum numunelerde, yüzey sertliği ve ısıdan etkilenen bölge genişliği ısı iletiminin yüksek olmasından dolayı, nispeten daha düşük olmaktadır.

Artan puls süresi ve gerilim parametrelerine bağlı olarak yüzey sertliği ve ısıdan etkilenen bölge genişliği artmaktadır. Dielektrik sıvı basıncı ve tel ilerleme hızlarının, sertlik artışında ve ısıdan etkilenen bölge genişliğinde etkisi ihmal edilebilecek düzeydedir.

Kesme işlemi sonunda, bütün numunelerde belirli ölçüde çatlak teşekkül etmektedir. Takım çeliklerinde özellikle de ısıl işlem görmüş numunelerde çatlakların yoğunluğu ve nüfuziyeti artmaktadır. Bu çatlakların bir hasar için başlangıç noktaları gibi davranmasının muhtemel olacağı dikkate alınarak, özellikle dinamik yükler altında çalışan makine elemanlarının tel erozyon yöntemiyle imal edilmeleri halinde yüzeyde koruyucu işlemlerin yapılması gerekmektedir.

Tel erozyonda elde edilen yüzey pürüzlülüğü, diğer klasik imalat yöntemlerinden farklı olarak kraterler şeklinde oluşmakta ve oldukça düşük elde edilmektedir. Puls süresi ve gerilim artışına bağlı olarak, yüzey pürüzlülüğü önemli ölçüde değişmektedir. Tel ilerleme hızı ve sıvı sirkülasyon basıncının yüzey pürüzlülüğü üzerinde nispeten daha az tesiri olmaktadır.

Kesme alanı arttıkça, yüzey pürüzlülüğü, ısıdan etkilenen bölge aralığı ve yüzey sertliği düşmektedir.

Puls süresinin ve gerilimin yüksek değerlerinde tel elektrotta zaman zaman kırılmalar görülmektedir. Bunun sonucunda zaman ve iş gücü kaybına neden olmaktadır. Tel ilerleme hızının ve sirkülasyon sıvı basıncının artırılması, tel kırılmalarını önemli ölçüde azaltmaktadır.

Alüminyum malzemelerin ergime sıcaklığına bağlı olarak talaş kaldırma hızları çelik numunelere nazaran oldukça yüksektir. Talaş kaldırma hızının artması, yüzey pürüzlülüğünün de artmasına neden olmaktadır.

Yüzey pürüzlülüğünü, tel kırılmalarını ve sertlik değişimini en az değerlerde tutabilmek amacıyla, düşük işlem parametrelerinde çalışılması gerekmektedir. Ancak, bu şartlarda da talaş kaldırma hızı düştüğünden, işlem süresi uzamaktadır.

Sonuç olarak farklı özelliklere sahip malzemelerde kesme işlemi sonunda makine elemanlarının çalışma verimleriyle doğrudan ilgili olan yüzey pürüzlülük ve mikro yapı değişimleri, işlem parametrelerine bağlı olarak değişmektedir. Bu bakımdan, üretilecek makine elemanından beklenen özelliklere göre uygun parametrelerin seçilmesi gerekmektedir.



ÖZGEÇMİŞ

1978 yılında Muş'ta doğan Ulaş ÇAYDAŞ, 1996 yılında Elazığ Gazi Endüstri Meslek Lisesinden mezun oldu. 2000 yılında Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Talaşlı Üretim Öğretmenliği Bölümünden mezun oldu. Halen Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümünde araştırma görevlisi olarak görev yapmaktadır.



KAYNAKLAR

1. "Different types of machining processes that use EDM", 2000, EDM Technology Transfer.
2. "Metal işlemede tel erozyon ve anti – elektroliz teknolojisi", 2001, Makine & Metal Dergisi, 120.
3. Baydur, G., 1979, *Malzeme*. Milli Eğitim Yayınları, Ankara, 241 – 246s.
4. Chou, Y.K. and Evans, C.J., 1997, "White layers and thermal modelling of hard turned surfaces", Proceeding of ASME IMECE, Manufacturing Science and Engineering MED 4, 75-82.
5. Fine Sodick Tel Erozyon Katalogu, Vol: 1.4G.
6. Gökler, M. İ and Ozanözgü, A. M., 2000, "Experimental investigation of effects of cutting parameters on surface roughness in the WEDM process", International Journal of Machine Tools & Manufacture, 40, 1831 – 1848.
7. Griffiths, B.J., 1987, "Mechanism of white layer generations with reference to machining and deformation Process", Journal of Tribology ASME 109 (3) 525-530.
8. Guo, Z. N., Lee, T. C., Yue, T. M. and Lau, W. S., 1997, "Study on the machining mechanism of WEDM with ultrasonic vibration of the wire", Journal of Materials Processing Technology, 69, 212 – 221.
9. Hsue, W. J., Liao, Y. S. and Lu, S. S., 1997, "Fundamental geometry analysis of wire electrical discharge machining in corner cutting", International Journal of Machine Tools & Manufacture, 39, 651 – 667.
10. Liao, Y. S. and Woo, J. C., 1996, "The effects of machining settings on the behavior of pulse trains in the WEDM process". Journal of Materials Processing Technology, 71, 433 - 439.
11. Liao, Y. S. and Woo, J. C., 2000, "Design of fuzzy controller for the adaptive control of WEDM process", International Journal of Machine Tools & Manufacture, 40, 2293 – 2307.
12. Liao, Y. S., Huang, J. T. and Su, H. C., 1996, "A study on the machining – parameters optimization of wire electrical discharge machining", Journal of Materials Processing Technology, 71, 487 – 493.
13. Nowicki, B., Pierzynowski, R. and Spadlo, S., 2001, "New possibilities of machining and electrodischarge alloying of free – form surfaces", Journal of Materials Processing Technology, 109, 371 – 376.
14. Poyrazoğlu, O. and Nalbant, M., 1994, "Elektroerozyon ile işlemede işleme parametrelerinin performansına etkisi", 7. Uluslar arası Makine Tasarım ve İmalat Kongresi, No: 2.

15. Prohaszka, J., Mamalis, A. G. and Vaxevanidis, N. M., 1996, "The effect of electrode material on machinability in wire electro – discharge machining", Journal of Materials Processing Technology, 69, 233 – 237.
16. Rebelo, J. C., Morao Dias, A., Kremer, D. and Lebrun, J. L., 1997, "Influence of EDM pulse energy on the surface integrity of martensitic steels", Journal of Materials Processing Technology, 84, 90 – 96.
17. Rennie, E. W. Allan, Bocking, E. Chris and Bennett, R. G., 2000, "Electroforming of rapid prototyping mandrels for electro – discharge machining electrodes", Journal of Materials Processing Technology, 110, 186 – 196.
18. Rozenek, M., Kozak, J., Dabrowski, L. and Lubkowski, K., 2001, "Electrical Discharge Machining characteristics of metal matrix composites", Journal of Materials Processing Technology, 109, 367 – 370.
19. Scott, D., Boina, S. and Rajurkar, P. K., "Analysis and optimization in WEDM", International Journal of Production Research", Vol: 29.
20. Smith, F. W., Erdoğan, M., 2000, *Mühendislik Alaşımlarının Yapı ve Özellikleri*. Nobel Yayın Dağıtım, Ankara, 278 – 283s.
21. Spedding, T. A. and Wang, Z.Q., 1997, "Parametric optimization and surface characterization of wire electrical discharge machining process", Precision Engineering, 20, 5 – 15.
22. *Takım Çelikleri*, 1990. Asil Çelik Teknik Yayınları No:4, 1 – 8s.
23. Tosun, N., 2001, "Tel Erozyonda Tel Aşınmasının ve Yüzey Pürüzlülüğünün Deneysel Olarak İncelenmesi ve Modellenmesi" F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.
24. Haşçalık, A. ve Savaş, V., 2000, "CNC Tel Erozyon Tezgahlarında D5 Takım Çeliği için Kesme Parametrelerinin Araştırılması." Journal of Z.K.Ü Karabük Technical Education Faculty, Sayı4: 165-175.